

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

PROGRAM NA GENEROVÁNÍ DVOUROZMĚRNÉHO ERLICHOVA LADĚNÍ

PROGRAM FOR GENERATING TWO-DIMENSIONAL ERLICH TUNING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Anna Dvořáková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Audio inženýrství**
specializace Zvuková produkce a nahrávání
Ústav telekomunikací

Studentka: Anna Dvořáková

ID: 203723

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Program na generování dvourozměrného Erlichova ladění

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte aplikaci pro generování tzv. dvourozměrného ladění. Bude obsahovat tyto parametry: 1) velikost periody v centech, 2) generátor základního intervalu v rámci periody v centech, 3) počet tónů v periodě, 4) počet tónů generátorů jdoucích do mínusu. Vše bude navázáno na MIDI a program bude pracovat také jako plug-in modul technologie VST. Součástí zadání je vytvoření nejméně deseti šablon typických tónových terénů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Erlich, Paul: A Middle Path Between Just Intonation and the Equal Temperaments, Part 1 8/27/04, <https://sethares.engr.wisc.edu/paperspdf/Erlich-MiddlePath.pdf>

[2] Geist, B.: Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312.

Termín zadání: 1.2.2021

Termín odevzdání: 31.5.2021

Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Schimmel, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

V rámci práce byl vytvořen program na generování dvourozměrného Erlichova ladění. Podle parametrů zadaných uživatelem je vypočítána frekvence jednotlivých stupňů v tónovém terénu. Temperament je možno ihned použít ke hře. Aplikace funguje samostatně i v rámci DAW.

KLÍČOVÁ SLOVA

dvourozměrné ladění, Paul Erlich, syntetizér, mikrointerval, temperament, MIDI, tónový terén, plugin, JUCE, C++

ABSTRACT

This thesis documents the creation of a program generating two-dimensional Erlich tuning systems. Using set parameters it computes the frequencies of each tone and enables the user to immediately play in the chosen tuning. The app works both as a plugin and as a standalone software.

KEYWORDS

rank-2 tuning, Paul Erlich, synthesiser, micro-interval, temperament, MIDI, tuning sytem, xenharmonics, plugin, JUCE, C++

ROZŠÍŘENÝ ABSTRAKT

Tato práce obsahuje dokumentaci o vývoji programu na generování dvourozměrného Erlichova ladění podle parametrů zadaných uživatelem.

Úvod

Zadáním práce bylo vytvořit aplikaci, která na základě parametrů, kterými jsou velikost periody, velikost intervalu generátoru, počet tónů v periodě a počet kroků generátoru v záporném směru, sestaví kompletní dvourozměrné ladění. Program má fungovat samostatně i v rámci DAW jako plugin. Jeho součástí má být deset přednastavených temperamentů.

V rámci semestrální práce byl v prosinci r. 2020 vytvořen první prototyp softwaru nabízející základní funkce generování tónových terénů. Na základě této zkušenosti vznikl nyní v rámci navazující bakalářské práce program splňující již všechny body zadání. Je však mým záměrem v jeho vývoji dále pokračovat.

Teoretický základ

V současné době je nejvíce využíváno dvanáctitónového rovnoměrného temperamentu. Jeho konstrukce však místy neodpovídá poměrům složek harmonické řady, která je fundamentem celého hudebního vnímání. V minulosti se zvyky více držely ladění přirozeného, tzv. *just intonation* a na jeho základě byla vytvořena většina historicky využívaných temperamentů. Ty se ale v případě nástrojů s pevnou stavbou setkávaly s mnoha problémy, jakmile začalo být v hudbě využíváno modulací během skladby. Proto bylo ladění 12-ET učiněno standardem.

S postupem času se hudební teoretici a moderní skladatelé začali opět k myšlence alternativních ladění vracet. Temperamenty byly zmapovány a popsány. Jedním z přístupů k analýze a syntéze ladění je ten P. Erlicha, který ve své esejí *Middle Path* [1] detailně popisuje vznik tzv. *dvourozměrných* ladění a propaguje také temperování oktavových kroků.

Na základě Erlichova systému matic a horagramů lze sestavit výpočet, kterým podle čtyř zadaných hodnot můžeme dobrat k výšce jakéhokoliv tónu v libovolném dvourozměrném ladění.

Realizace aplikace

Pomocí programovacího jazyka C++ a knihoven JUCE byl nejprve v rámci semestrální práce vytvořen jednoduchý prototyp. V rámci práce bakalářské vznikla nová verze fungující jako samostatná aplikace i plugin v DAW. Program nyní obsahuje kromě základních parametrů další čtyři volby pro tvorbu tónového terénu, tři možné

zvukové charaktery s ovládáním ADSR obálky nebo dynamický horagram pro vizualizaci. Nyní je možno si vybrat z následujících presetů:

1. 12-ET
2. 24-ET
3. Pythagorejské ladění
4. TOP Meantone (středotónové ladění)
5. TOP Helmholtz (schismatické ladění)
6. TOP Hanson
7. TOP Magic
8. TOP Miracle
9. TOP Amity
10. TOP Dicot
11. TOP Mavila
12. TOP Keemun
13. TOP Beatles
14. TOP Porcupine
15. TOP Orwell

Další vývoj aplikace se může vydat směrem rozvinutí zvukového charakteru či uzpůsobením pro přeladování existujících virtuálních nástrojů. Může být přidáno zadávání temperamentů dle zanikajícího komma. Dalšími možnostmi jsou další způsoby vizualizace, optimalizování čtení z obrazovky nebo možnost exportu souborů *.tun*.

Závěr

V rámci této práce byly splněny požadavky uvedené v zadání. Aplikace plní svou funkci a je možno ji reálně využít. Zároveň má stále potenciál pro další zlepšení.

DVOŘÁKOVÁ, Anna. *Program na generování dvourozměrného Erlichova ladění*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2021, 60 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Anna Dvořáková
VUT ID autora: 203723
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2020/21
Téma závěrečné práce: Program na generování dvourozměrného Erlichova ladění

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Mé vřelé díky patří vedoucímu diplomové práce panu MgA. Mgr.Ondřeji Jiráskovi, Ph.D. za zprostředkování tohoto zajímavého a netradičního tématu. Děkuji také panu MgA. Petru Pařízkovi, Ph.D. z Janáčkovy akademie múzických umění za zasvěcení do problematiky a mnoho věcných podnětů k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Teoretický základ práce	14
1.1 Problematika ladění	16
1.1.1 Interval	18
1.1.2 Přirozené ladění	19
1.1.3 Historická ladění založená na harmonické řadě	20
1.1.4 Rovnoměrně temperované ladění	22
1.2 Pojetí P. Erlicha	23
1.2.1 Horagram	25
1.3 Matematické vyjádření dvourozměrného ladění	26
1.3.1 Přičítání/odečítání intervalu generátoru	26
1.3.2 Transpozice do rámce jedné periody	27
1.3.3 Seřazení hodnot dle stupně nebo velikosti	27
1.3.4 Aplikování hodnot na zbytek rozsahu a převod na kmitočet	28
1.4 Temperament ve světě virtuálního nástroje	29
1.5 Prostředí, jazyk a knihovny zvolené pro realizaci	29
1.5.1 Práce s JUCE	30
2 Realizace aplikace	31
2.1 Prototyp vytvořený v rámci semestrální práce	31
2.1.1 Původní presety	32
2.2 Aktuální verze aplikace	35
2.2.1 Ovladatelné prvky aplikace	36
2.2.2 Fungování v rámci DAW	38
2.2.3 Struktura kódu	39
2.2.4 Algoritmizace matematického základu	40
2.2.5 Katalog přidanych presetů	44
2.3 Možnosti dalších vylepšení	52
Závěr	55
Literatura	56
Seznam symbolů a zkratk	58
Přílohy	59

Seznam obrázků

1.1	Sinusová vlna jako dílek skládačky	16
1.2	Pilová vlna jako skládačka	16
1.3	Znázornění ruchu pomocí skládačky	17
1.4	Harmonická řada	17
1.5	Enharmonická stupnice v JI	20
1.6	Jednorozměrný tónový terén	23
1.7	Matice tónového terénu Pythagorejského ladění z práce P. Erlicha [1]	24
1.8	Horagram Pythagorejského ladění z práce P. Erlicha [1]	25
1.9	Uživatelské prostředí pluginu GalactiX2 [10]	29
1.10	Aplikace Projucer s hierarchií vytvářeného programu	30
2.1	Prototyp aplikace z prosince 2020	31
2.2	Horagram ladění TOP Helmholtz dle P. Erlicha [1]	32
2.3	Horagram ladění TOP Hanson dle P. Erlicha [1]	33
2.4	Horagram ladění TOP Meantone dle P. Erlicha [1]	34
2.5	Uživatelské prostředí aplikace	35
2.6	Obsah menu „Options“	36
2.7	Prvek zjednodušeného horagramu	37
2.8	Virtuální klaviatura	37
2.9	Parametrové slidery	37
2.10	Řádek přídatných funkcí	38
2.11	Řádek nastavení syntezátoru	38
2.12	Minimalizovaný plugin v DAW Ableton Live 10 Lite	39
2.13	Blokové schéma programu	40
2.14	Úprava záporného intervalu generátoru	40
2.15	Získání řady hodnot	41
2.16	Řazení podle velikosti	41
2.17	Řazení podle stupně	42
2.18	Alternativní rozložení klaviatury	43
2.19	Běžné rozložení klaviatury	43
2.20	Převod hodnot na kmitočty	43
2.21	Dvanáctitónové rovnoměrně temperované ladění	44
2.22	Dvaceti-čtyřtónové rovnoměrně temperované ladění	45
2.23	TOP Magic	46
2.24	TOP Miracle	46
2.25	TOP Amity	47
2.26	TOP Dicot	48
2.27	TOP Mavila	49

2.28	TOP Keemun	49
2.29	TOP Beatles	50
2.30	TOP Porcupine	50
2.31	TOP Orwell	51
2.32	Aplikace Alt-tuner od Tall Kite [18]	52

Seznam tabulek

1.1	Durová diatonická stupnice v JI	19
1.2	Mollová diatonická stupnice v JI	19
1.3	Pythagorejská soustava	21
1.4	Manipulace s intervalem generátoru	26
1.5	Princip řazení tónů podle stupně	27

Úvod

Tato práce je dokumentací k procesu vytváření audio aplikace pro účel generování tzv. dvourozměrných ladění a to na základě teoretických zákonitostí definovaných P. Erlichem [1]. Program dle uživatelem zadaných parametrů vypočítá výšky tónů v požadovaném tónovém terénu. Tuto informaci v reálném čase přiřazuje jednotlivým hodnotám MIDI vstupu. Výstup je následně realizován pomocí syntezátoru. Aplikaci lze využít v její *standalone* podobě i ve formátu VST3 kompatibilním s většinou standartních DAW prostředí.

Primárními nastavitelnými parametry jsou:

1. Velikost periody v centech
2. Interval generátoru v rámci periody
3. Počet tónů v periodě
4. Počet generovaných intervalů v záporném směru

Mezi sekundární parametry patří např. počáteční tón výpočtu, způsob řazení tónů v periodě či rozdělení klaviatury pro pohodlné hraní u tónových terénů s počtem stupňů odpovídajícím násobkům dvanácti. Uživatel také může volit mezi několika základními zvuky syntezátoru nebo si vybrat již popsany temperament z nabídky přednastavených presetů.

V rámci semestrální práce byl vytvořen první prototyp programu, který demonstroval základní funkcionalitu počínů. Aplikace obsahovala základní parametry, generovala sinusovou vlnu a fungovala pouze v podobě nevázané na hostitelský DAW. Nabízela čtyři presetů a již šlo ovládat řazení tónů v periodě.

Nyní v rámci bakalářské práce představím druhou verzi programu, který již funguje i jako *plugin* a obsahuje více možností a funkcí než jeho prototypový předchůdce. Výsledek ještě bude zcela jistě potřebovat další zásahy a inovace pro naplnění potenciálu, který je dle mého názoru na poli audio softwaru unikátní. Už nyní však mohu nabídnout plně funkční verzi splňující zadané požadavky.

Námět na téma práce pochází od pana MgA. Petra Pařízka, Ph.D. z Janáčkovy akademie múzických umění v Brně, který se problematice ladících systémů věnuje.

Tento dokument obsahuje dvě hlavní tematicky odlišné sekce. V **teoretickém základu** (kapitola č.1) se budu věnovat samotné problematice ladění, temperování a matematickým zákonitostem, na základě kterých lze vytvořit libovolný dvourozměrný tónový terén. Uvedu příklad algoritmů, které je nutno využít při uvedení těchto výpočtů do praxe. Nakonec vysvětlím svou volbu prostředků pro realizaci aplikace. Druhou část bude tvořit popis samotné **realizace aplikace** (kapitola č.2), demonstrace jejích aktuálních funkcí a vize dalších možných inovací do budoucna.

1 Teoretický základ práce

V případě této práce, která se zabývá praktickým využitím specifického odvětví hudební teorie, je pro porozumění funkce programu nutno osvětlit hudebně teoretické pozadí, které je ukryto „pod kapotou“. Informací je zde mnoho, budu se však snažit vše vysvětlit pomocí ukázek a příkladů. Zvážím i otázku toho, jak vše co nejvíce zjednodušit a učinit názorným. Důležitým záměrem při vytváření programu je pro mě totiž uzpůsobit jej běžnému uživateli pohybujícímu se v prostředí virtuálních nástrojů a hudby využívající MIDI.

Průměrného uživatele si zde můžeme představit jako někoho, kdo má základní nebo selektivní amatérské hudební vzdělání. Tento uživatel (dále **IU** - *imaginary user*) vlastní některý z obecně dostupnějších DAW a používá sadu *pluginů* různého původu a funkcí. IU pojme zájem o problematiku temperování a zatouží po virtuálním nástroji, který by mu umožnil co nejsvobodnější využití nerovnoměrného ladění. Přečte si pár stránek na internetu, možná shlédne nějaká videa. Následně si s velkým očekáváním stáhne tento software.

Pokud se při spuštění aplikace na monitoru objeví změt čísel a nesrozumitelných popisů, je téměř jisté, že bude IU nadobro odrazen od celé problematiky. Očekával, že se program bude chovat jako ostatní aplikace, které využívá. Že jej obsah okna spolehlivě navede k úspěšnému nastavení parametrů a pochopení, jak se navzájem ovlivňují. Nutno podotknout, že zklamaný IU není indikátorem špatného fungování programu. Takovouto aplikaci by stále mohl ocenit odborník pohybující se dlouhodobě v oboru. Touto nepřístupností by však zanikl plný potenciál.

Temperování patří mezi hudební témata, o kterých většina laiků netuší zcela nic, a část muzikantů vnímá pouze okrajově či jako záležitost patřící nenávratně do doby před momentem, kdy bylo jako standart západní hudby ustanoveno ladění využívající dvanácti shodných intervalů v oktávě. Je tedy pro dvourozměrná ladění v moderní době místo? Nebo bychom naopak měli rázně označit rovnoměrné temperované ladění za nevhodný nešvar posledních několika set let a tvrdě stát za návratem přirozené intonace?

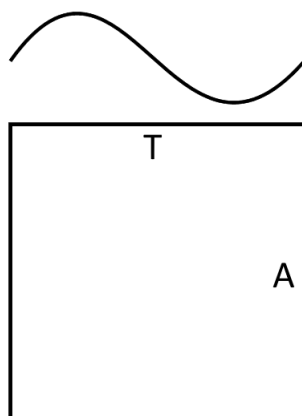
V tomto ohledu se nekloním na žádnou ze stran. Rovnoměrné ladění díky svým „chybám“ poskytuje skladatelům široké spektrum využití; vždyť se nám otevírá pole svobodných transpozicí a modulací do libovolných tónin. Pokud využijeme vícerozměrný tónový terén, najdeme zde však zcela nové zajímavé anomálie, které jen čekají na využití. Jako dokonalé řešení se mi zdá vybudovat si uvědomění o existenci všemožných temperamentů, otevřít mysl novým vjemům a nenadsazovat jeden nad druhý, pouze je všechny vnímat jako neobyčejný a nekonečný soubor možností.

Jak napsal na počátku minulého století hudební teoretik Feruccio Busoni[2] a v roce 2015 uvedl v českém překladu PhDr. Martin Flašar, Ph.D.[3]:

„Jak důležitá je přece tercie, kvinta a oktáva! Jak přísně rozlišujeme konsonance a disonance tam, kde vůbec žádných disonancí není! Rozčlenili jsme oktávu na dvanáct stejně od sebe vzdálených intervalů, poněvadž jsme si museli nějak vypomoci, a upravili jsme naše nástroje tak, že se nemůžeme nikdy dostat nad, pod anebo mezi stanovené intervaly. Hlavně klávesové nástroje měly důkladný vliv na náš sluch, takže nejsme vůbec schopni slyšet jinak než nečistě. Avšak příroda stvořila nekonečné odstupňování — nekonečné! Ví to dnes ještě někdo?“

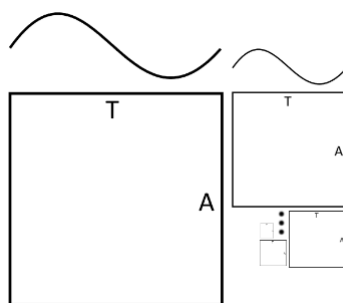
1.1 Problematika ladění

Představme si zvuk jako matematickou skládačku. Pokud dostaneme do ruky jediný čtvercový dílek o stranách T a A , díváme se na grafické znázornění jednoduché sinusové vlny, které je našim očím stejně srozumitelné jako našim uším zmíněná vlna. Strana T pro nás představuje periodu tohoto signálu, strana A relativně odpovídá amplitudě.



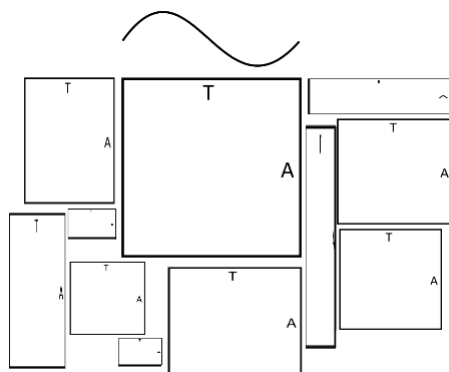
Obr. 1.1: Znázornění sinusové vlny v kontextu přirovnání ke skládačce

Podobně srozumitelně na nás v tomto znázornění bude působit pilová charakteristika vlny. Dostaneme sice do rukou čím dál menší čtvercové díly, díky poměrům mezi nimi však intuitivně víme, kam každý další díl položit. Okamžitě identifikujeme, jak spolu vše souvisí a kde vše začíná a končí. Podobným myšlenkovým procesem dochází k identifikování zvuku jako tónu, přestože je složen z mnoha různých frekvencí.



Obr. 1.2: Znázornění pilové vlny v kontextu přirovnání ke skládačce

Když bychom však byli požádáni, abychom našli systém v následujícím příkladu, nebyl by to už tak jednoduchý úkol. Parametry T ani A jednotlivých dílků spolu neudrží žádnou viditelnou posloupnost. Lze zde polemizovat o tom, který dílek je vlastně „hlavním“ dílkem, tedy *fundamentem* skládačky. Podobným způsobem vnímáme pomocí sluchu různé nehudební ruchy - občas v nich dokážeme identifikovat tóny, často však jde jen o jakési neurčité shluky kmitů narážejících na náš ušní bubínek.



Obr. 1.3: Znázornění ruchu v kontextu přirovnání ke skládačce

Vnímání zvuku jako tónu je tedy přímo svázáno s existencí matematické posloupnosti mezi většími a menšími složkami. Když se budeme snažit stavět s dvěma neshodnými, však podobně velkými dílky, vždy nám někde vznikne přesah či mezera. Ve zvukové rovině tyto skutečnosti odpovídají tzv. *záznějům*. Je tedy v našem nejlepším zájmu skládat k jedné velké kostičce dvě o polovinu menší. A k této malé kostce opět dvě poloviční. Bez ohledu na to, kolik různých velikostí použijeme, bude při dodržení jejich poměrů vždy existovat společná hrana, na které se jejich stěny potkají.

Přejdeme od analogie se skládačkou k napůl zkracující se periodě a tedy násobení frekvence dvěma. Vzniká nám zvuk, který můžeme nazvat *periodickým*[4]. Když zaznamenáme složky v jejich posloupnosti, máme před sebou základní kámen tonality - **harmonickou řadu**.



Obr. 1.4: Harmonická řada od velkého C

Amplituda jednotlivých harmonických složek určuje *barvu* tónu. U vysokých harmonických také můžeme pozorovat tzv. *formanty*, tedy oblasti lehce zvýšené amplitudy harm. složek [6]. Existence harmonické řady ve zvuku pro nás tedy značí jeho „hudebnost“, vzájemné poměry jejích složek pak celkový charakter zvuku.

Máme tedy nyní definován tón jako takový a je čas věnovat se **intervalu**.

1.1.1 Interval

Když pomineme interval primy jakožto unisono, druhý nejpřirozenější interval pro člověka je **oktáva**. Ve frekvenčním poměru $2 : 1$ jde o interval, který se malé děti naučí vnímat řádově mezi druhým a pátým rokem života[7]. Bez sebemenšího ponětí o fyzikálních zákonitostech člověk už odpradáвна zpívá stejnou melodii v oktávách dle rozsahu svého vlastního hlasu.

V harmonické řadě oktáva v poměru $2 : 1$ přesně odpovídá druhé harmonické složce tónu. Tento poměr se tedy přirozeně stává prvním stavebním článkem přirozeného tónového terénu, který je přímo odvozen z harmonické řady. Nabízí se nám ihned možnost pokračovat dál ve stejné logice.

Kvintu získáme při pohledu na vztah mezi druhou a třetí harmonickou složkou. Zcela čistá kvinta je tak určena poměrem $3 : 2$. Jedná se o ten samý interval, který zvládnou pouze pomocí sluchu perfektně naladit hráči na smyčcové nástroje. U tohoto intervalu je totiž možno jednoduše sluchem zaznamenat vznikající periodicitu i zázněje, které se razantně mění jakmile je muzikant k perfektní kvintě blízko. Podobně lze identifikovat i další intervaly založené na harmonické řadě, s čím dál složitějším poměrem však narůstá přirozená chybovost[7].

Poměr mezi třetí a čtvrtou harmonickou složkou nám dále tvoří **kvartu**, následující dva poměry velkou a malou **tercii**. Co se velké **sekundy** týče, dostaneme se k poměru $9 : 8$. Zjistíme však, že pokud druhý stupeň vytvoříme tímto způsobem, vznikne nám mezi tímto a třetím stupněm ve vznikající stupnici poměr $10 : 9$. Máme tu tedy *velký celý* a *malý celý* tón. Pokusíme-li se pak najít **půltón**, z intervalu mezi třetím a čtvrtým stupněm nám vyplyne poměr $16 : 15$.

Když si odvodíme **sextu** jako $5 : 3$ a **septimu** jako $15 : 8$, máme před sebou základ tónového terénu nazývaného *přirozené ladění* neboli *just intonation* (dále *JI*).

1.1.2 Přirozené ladění

Sestavili jsme nyní kompletní diatonickou stupnici od zvoleného tónu (zde v příkladech pro názornost volím tón C). Všechny její základní stupně mají mezi sebou poměry odpovídající harmonické řadě. Mezi jednotlivými po sobě jdoucími tóny se nachází tři možné poměry: *velký celý tón* (10 : 9), *malý celý tón* (9 : 8) a *půltón* (16 : 15)[4].

tón	C	D	E	F	G	A	H	c
poměr	1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2
krok		9:8	10:9	16:15	9:8	10:9	9:8	16:15

Tab. 1.1: Durová diatonická stupnice v JI

Nevyužili jsme však malou tercii o poměru 6 : 5, která je typickou pro této stupnici odpovídající mollovou diatonickou řadu. Mollová stupnice v JI bude vypadat následovně:

tón	A	H	c	d	e	f	g	a
poměr	1	9:8	6:5	4:3	3:2	8:5	9:5	2
krok		9:8	16:15	10:9	9:8	16:15	9:8	10:9

Tab. 1.2: Mollová diatonická stupnice v JI

Všimněme si, že kromě malé a velké **tercie** nyní máme k dispozici i malou a velkou **sextu** a **septimu**. Když porovnáme malou a velkou variantu každého z těchto intervalů, zjistíme, že mezi sebou nemají půltón o velikosti 16 : 15, nýbrž tzv. *malý půltón* odpovídající poměru 25 : 24.

$$\frac{5}{4} : \frac{6}{5} = \frac{5}{3} : \frac{8}{5} = \frac{15}{8} : \frac{9}{5} = 25 : 24 \quad (1.1)$$

Rozdíl mezi malým a velkým půltónem tvoří tzv. **malá diesis** (v angličtině *lesser diesis*).

$$\frac{16}{15} : \frac{25}{24} = \frac{128}{125} = 1,024 = 41,06C \quad (1.2)$$

V tuto chvíli se poprvé na cestě od tónu k temperování setkáváme s fenoménem známým jako **komma**. Lze takto nazvat malý interval, který vznikne, když porovnáme dva postupy pro získání shodného stupně tónového terénu odlišnými postupy.

Pokud chceme v JI sestavit chromatickou stupnici, nevystačí nám dvanáct stupňů jako v rovnoměrně temperovaném ladění, jelikož každý tón v ní lze chromaticky zvýšit či snížit o malý půltón, který se od velkého liší právě o malou diesis. V řadě od C do c se nám tedy objeví 22 různých výšek tónu.



Obr. 1.5: Enharmonická stupnice v JI

Takovéto vnímání intervalů lze naučit zpěváky či hráče na nástroje schopné glissanda [8]. Problém však nastává jakmile je zapotřebí vyrobit jakýkoliv nástroj s pevnou mechanikou či pražci. Narazíme na spoustu bariér, a to jak v samotné konstrukci, tak v praktičnosti hry na výsledný nástroj, např. klavíristovy ruce již nemají potřebný rozsah či koordinaci pro ovládání dvaceti dvou klapek na oktávu.

V západní hudbě se navíc později objevilo tzv. *modulování*, tedy změny tóniny v průběhu jedné skladby. U přirozeného ladění je modulace kamenem úrazu, jelikož je třeba sestavit si od počátečního tónu nové tóniny zcela novou enharmonickou řadu. Pokud bychom tak neučinili, setkáme se s množstvím neideálně znějících intervalů včetně obecně známého tzv. *vlčího* intervalu. Jde o kvintu mezi druhým a šestým stupněm diatoniky, která je se svým poměrem 40 : 27 o přibližně 22 centů níže než čistá kvinta (3 : 2).

Dříve než byla modulace běžným výrazovým prostředkem se však převážná většina tónových systémů zakládala na základních principech JI.

1.1.3 Historická ladění založená na harmonické řadě

První tónové soustavy starověku a středověku byly založeny na poměrech harmonické řady tónu, konkrétně na intervalech kvinty a oktávy, které jsou pouhým uchem zaznamenatelem [5]. Objevila se však řada různých matematických přístupů k problematice, podle kterých můžeme rozlišit tyto historické tónové terény.

Ještě před plným sestavením JI, jak jsme si jej představili výše, přišel Aristotelův žák **Aristoxenos** se svou harmonickou soustavou, kterou také nazýváme **Dydimické ladění**.

Aristoxenes již definoval existenci malého a velkého půltónu. Svými poměry stupňů durové a mollové diatoniky taktéž předznamenal plnou řadu JI. Pro tohoto filozofa se však vše zamotalo objevem tzv. *syntonického (dydimického) komma*, kterým byly od sebe vzdáleny odlišné výšky šesti intervalů ze třinácti možných. Toto komma definoval poměrem 81 : 80. Obecně se tato odchylka získá porovnáním terciového a kvintového postupu pro získání tónu.

Pro příklad uvádím porovnání dvou výšek velké tercie. Můžeme ji získat buď poměrem 5:4 z harmonické řady nebo postupem čtyř kvint směrem vzhůru a následně transponováním o dvě oktávy dolů.

$$\frac{5}{4} : \frac{(\frac{3}{2})^4}{2 \cdot 2} = \frac{5}{4} : \frac{81}{64} = \frac{80}{81} = 21,51C \quad (1.3)$$

Dalším důležitým historickým laděním je Pythagorova **kánonická soustava**, která svým způsobem vzniku předznamenává dvourozměrná ladění jako taková.

Toto ladění vychází z pouhých dvou počátečních informací; poměr oktávy a poměr kvinty. Princip získání všech tónů v terénu spočívá v přičítání či odčítání kvintových kroků k počátečnímu tónu a následné transponování je pomocí oktáv do požadované výšky. Pokud např. odečteme od tónu c čistou kvintu a přičteme oktávu, vznikne nám kvarta o velikosti 4 : 3 - stejně jako kvarta z harmonické řady. Sexta nám však stejným způsobem vychází již odlišně od JI, a to 27 : 16.

tón	C	D	E	F	G	A	H	c
poměr	1	9:8	81:64	4:3	3:2	27:16	243:128	2
krok		9:8	9:8	256:243	9:8	9:8	9:8	256:243

Tab. 1.3: Pythagorejská soustava

V tabulce můžeme vidět, že zde již existují pouze dvě různé velikosti intervalu mezi stupni: pythagorejský celý tón *tónos* (9:8) a malý pythagorejský půltón *limma*[4] (256:243).

Když sestavíme k této stupnici odpovídající mollovou řadu a vypočítáme rozdíl mezi získanou velkou a malou tercií, vyjde nám tzv. *apotomé* neboli velký pythagorejský půltón o velikosti 2187:2048. Mezi ním a *limmou* se nachází *pythagorejské komma*.

$$\frac{256}{246} : \frac{2187}{2048} = \frac{3^{12}}{2^{19}} = 23,5C$$

Ke stejnému výsledku také dojdeme, pokud porovnáme sedm oktávových a dvanáct kvintových kroků vzhůru; získáme dva různé tóny vzdálené od sebe v poměru odpovídajícím pythagorejskému komma.

V pythagorejském ladění opět vzniká potíž v případě modulace skladby v průběhu hraní - žádné dvě tóniny nezní stejně kvůli specifickému rozložení *apotomé* a *limma*. Tak tomu ovšem je vždy, když tónový terén obsahuje dvě a více velikostí kroků. Tato vlastnost může být chápána buď jako charakter nebo jako nežádoucí jev.

Bylo to však převážně kvůli technicko-konstrukčním potížím, proč vznikla tendence aproximovat všechny stupně na stejnou velikost a zavést tak **enharmonickou záměnu**, tedy nahrazení dvou tónů, které dělí vzdálenost některého z *kommat*, jediným, jenž má být použit namísto obou instancí.

1.1.4 Rovnoměrně temperované ladění

Použití oktávy a kvinty tak, jak se nacházejí v harmonické řadě, pro tvorbu tónového terénu nemohlo logicky přinést zcela rovnoměrný temperament. Kvinta se tedy musela zmenšit o takový poměr, který by vyrovnal ono *pythagorejské komma*, které mezi jejími dvanácti kroky a sedmi oktávovými vzniká. Každý krok se tak snížil přesně o $\frac{1}{12}$ pythagorejského kommatu. Tomuto drobnému intervalu říkáme **schisma**.

Vzniká tak terén o dvanácti shodných krocích: $n = \sqrt[12]{2} \approx 1,059463$.

Tento krok lze rozdělit na 100 tzv. *centů*, které jsou nejmenší běžně používanou jednotkou v oblasti ladění. Jeden cent odpovídá poměru $\sqrt[1200]{2}$ a ve standardní oktávě o poměru 2:1 jich najdeme 1200. Nutno poznamenat, že rozdíl jednoho centu není lidským uchem zaznamatelný. Slyšitelný rozdíl se pohybuje kolem 5-6 centů [9].

Kromě v nynější době nejhojněji používaného dvanáctistupňového rovnoměrného temperamentu patří do stejné skupiny i 24 tónová či 36 tónová stupnice, z méně obvyklých pak můžeme narazit na temperamenty s 19 či 31 shodně velkými stupni. Možnosti jsou však v podstatě neomezené; stačí rozdělit oktávu na libovoný počet dílků. Tak lze učinit použitím vztahu:

$$i = \sqrt[n]{m}$$

Neznámá i zde představuje hledaný poměr jednoho stupně, za n si dosadíme požadovaný počet tónů v *periodě* a m představuje velikost této periody, která v případě použití čisté oktávy odpovídá poměru 2 : 1.

1.2 Pojetí P. Erlicha

Rovnoměrně temperované systémy, ve kterých se dopátráme veškerých obsažených tónů pouhým přičítáním konstantního stupně v kontextu této práce můžeme označit jako *jednorozměrné*. Použijí-li pro vysvětlení tohoto označení grafické znázornění terénu po vzoru P. Erlicha v jeho studii *A Middle Path* [1], vypadá rovnoměrně temperovaný systém následovně:



Obr. 1.6: Jednorozměrný tónový terén

Jako I zde označuji interval, o který se vždy následující tón posune. V případě rovnoměrně temperované dvanáctitónové soustavy interval odpovídá 100 centům.

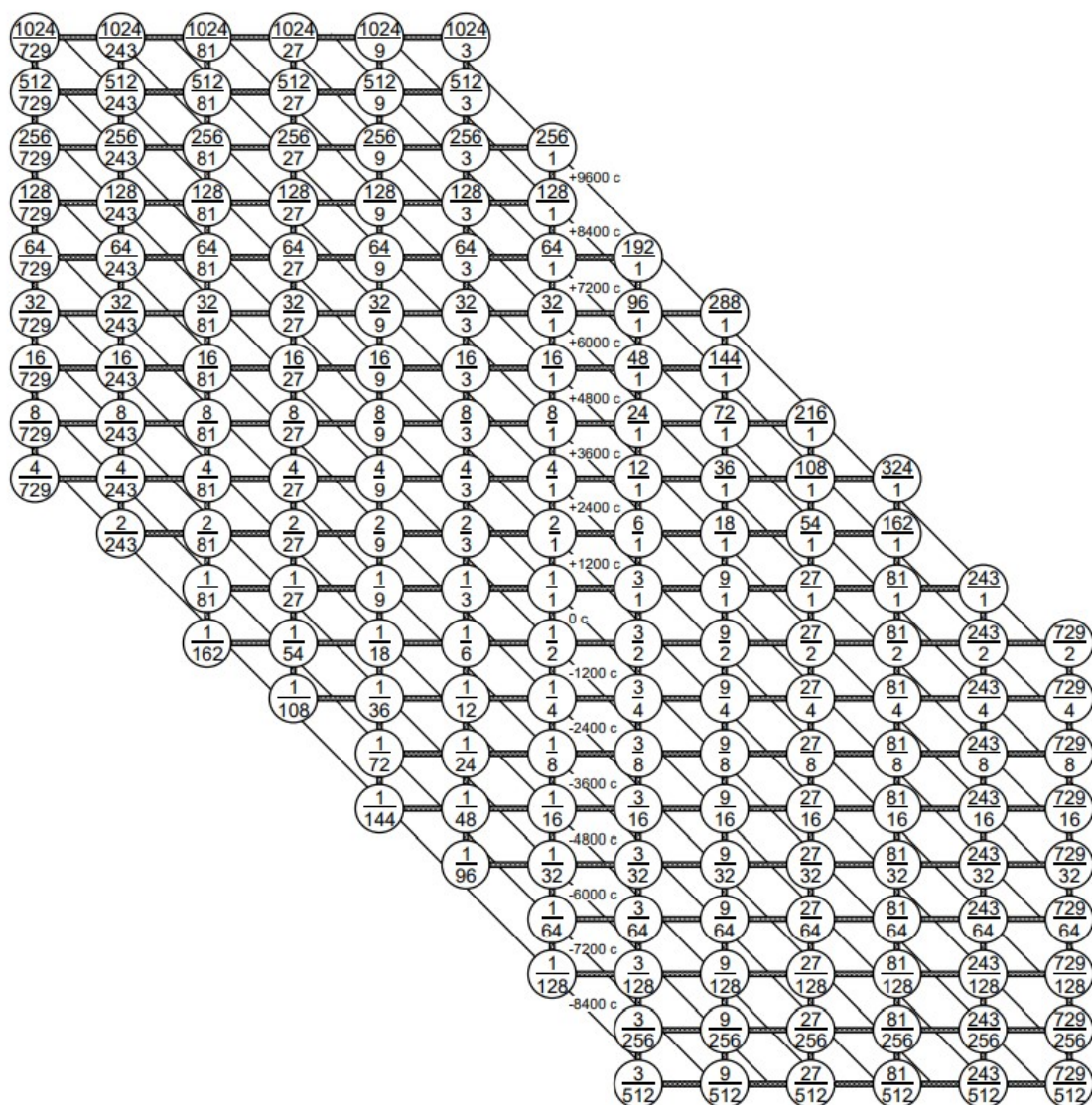
Pomocí grafu lze však vyjádřit i ladění dvourozměrná, tedy ta, která mají dvě různé velikosti kroku mezi jednotlivými stupni temperamentu. Jako základní příklad dvourozměrného ladícího systému používá P. Erlich ve své práci *Middle Path*[1] pro snadné znázornění všech zákonitostí nám již známé *pythagorejské ladění*, které se vyznačuje kvintou o 701.96 centech (tedy v poměru 3 : 2).

Na jeho grafu (1.7) lze spatřit dvourozměrnou matici vyjádřenou ve frekvenčních poměrech. Postup vzhůru zde značí oktavový posun o 1200 centů, tedy poměr 2 : 1. Na vodorovné ose sledujeme postup v poměru 3 : 1, tedy oktáva s přidanou kvintou vyjádřitelná jako cca 1901,96 centů. Diagonální linie vyjadřují odchylku jednotlivých stupňů vůči 12-TET. Erlich takto znázorňuje celý tónový terén zmíněného ladění včetně *pythagorejského komma*.

Erlichova matice obsahuje veškerý tónový materiál obsažený v systému. Používá také pro orientaci v něm souřadnicový systém s počátkem v hodnotě $\frac{1}{1}$ (tedy 0 centů), díky kterému lze získat vzájemnou vzdálenost kterýchkoliv dvou tónů v tónovém terénu. Když bychom tak např. chtěli znát přesnou velikost intervalu mezi jednočárkovaným G a A, postupem v kvintách a oktávách si najdeme poměry obou tónů ku počátku a z nich sestavíme poměr nový [4].

$$i_{GA} = \frac{27}{\frac{16}{3}} = \frac{9}{8}$$

$$i_{GA_C} = \frac{1200}{\log 2} \log \frac{9}{8} = 203,91C \quad (1.4)$$



Obr. 1.7: Matice tónového terénu Pythagorejského ladění z práce P. Erlicha [1]

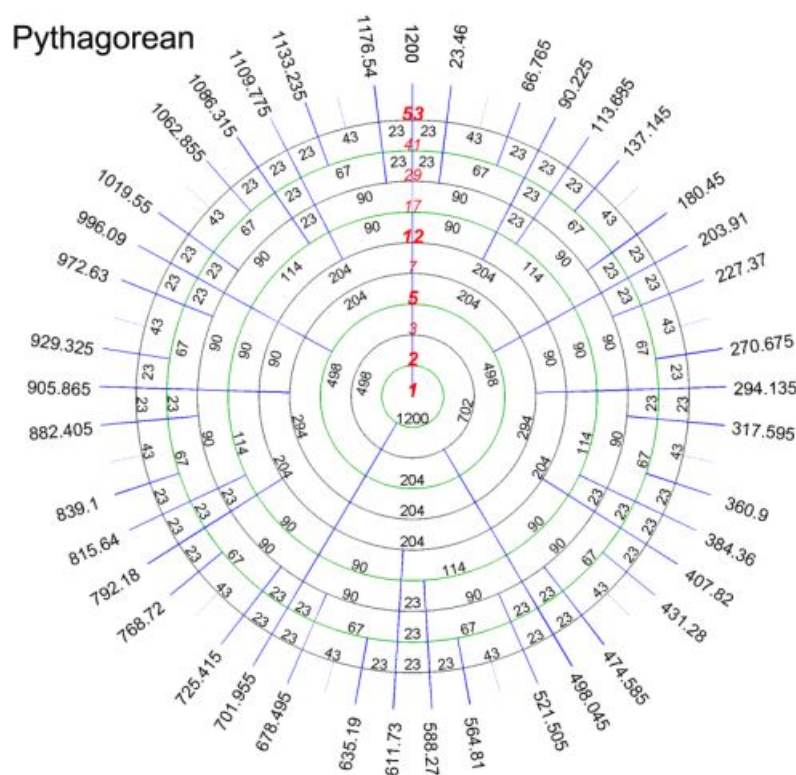
Za předpokladu, že známe velikost *periody* (zde oktávy) a *intervalu*, který pro vygenerování dvourozměrného ladění použijeme, můžeme pomocí podobné matice vypočítat velikost a rozložení stupňů v jakémkoliv systému tohoto typu. Otevírá se tak škála možností využitelných pro zkoumání nových kompozičních a interpretačních možností v moderní hudbě.

Ve starších pokusech o temperování si můžeme často povšimnout tendence zanechávat periodě výšku 1200 centů, tedy přesné oktávy. V Erlichově práci je však převážná většina temperamentů tvořena i lehkým posunem oktávy. Od tohoto postupu je také odvozen přívlastek *TOP* u mnoha ze systémů zmíněných v Erlichově práci *Middle Path* [1], který je zkratkou pro *Tempered Octaves, Please*, tedy „Temperované oktávy, prosím“.

P. Erlich se při specifikování parametrů tónových terénů převážně drží postupu, kdy první interval generátoru aplikuje v negativním směru. Je však nutno poznamenat, že volba parametru počtu kroků v záporném směru závisí zcela na uživateli a na jeho preferencích v konkrétním případě. Presety aplikace jsou však v rámci obecného usnadnění nastaveny dle Erlichových parametrů.

1.2.1 Horagram

P. Erlich ve své práci[1] uvádí seznam svých TOP ladění doprovázený obsáhlou přílohou kruhových grafů, tzv. *horagramů*. Ty usnadňují orientaci ve zvoleném temperamentu. Perioda zde odpovídá 360 stupňům a kruhové výseče značí interval generátoru jako její poměrovou část. Jednotlivé soustředné kružnice ukazují vhodné počty tónů v periodě pro zvolený temperament.



Obr. 1.8: Horagram Pythagorejského ladění z práce P. Erlicha [1]

Tento způsob vizualizace temperamentů je velmi názorný a dá se z něj jednoduše odvodit přibližný charakter tónového terénu. Proto s horagramem pracuji v rámci aplikace jako s prvkem uživatelského prostředí (*user interface*, dále *UI*). Ve zjednodušené podobě může běžnému uživateli velmi usnadnit orientaci ve funkcích aplikace.

1.3 Matematické vyjádření dvourozměrného ladění

Pro sestavení tónového terénu je nutno provést výpočty v následujícím pořadí:

1. Přičítání/odečítání intervalu generátoru (viz 1.3.1)
2. Transpozice do rámce jedné periody (viz 1.3.2)
3. Seřazení hodnot dle stupně nebo velikosti (viz 1.3.3)
4. Aplikování hodnot na nižší a vyšší periody rozsahu (viz 1.3.4)
5. Převod z centů na kmitočty (viz 1.3.4)

Kromě základních parametrů (perioda, interval generátoru, počet tónů v zadané periodě a počet kroků generátoru v záporném směru) je nutno znát požadovaný způsob řazení tónů, požadavek na rozvržení klaviatury a počáteční tón tvorby temperamentu.

1.3.1 Přičítání/odečítání intervalu generátoru

Parametry jsou uživatelem zadány v centech a po velkou část matematického procesu je s nimi nadále v této podobě pracováno. Jako počátek, tedy 0 centů, označujeme počáteční tón temperamentu, který lze v aplikaci nastavit. Jeho frekvenční a MIDI hodnotu však budeme potřebovat znát až později.

Velikost intervalu generátoru určuje velikost kroku od počátku. Počet kroků v záporném směru indikuje, kolikrát tento interval odečítáme. Počet tónů v periodě určuje celkový počet hodnot, které se v rámci periody budou vyskytovat, tedy včetně záporných.

$I \cdots$ interval generátoru,

$x \cdots$ počet tónů v periodě,

$z \cdots$ počet kroků v záporném směru.

index	$-z$	-2	-1	0	1	2	$x - z - 1$
hodnota	$-zI$	$-2I$	$-I$	0	I	$2I$	$(x - z - 1)I$

Tab. 1.4: Manipulace s intervalem generátoru

Pokud tedy uživatel zadá interval o velikosti 701,96C, dvanáct tónů v periodě a šest v záporném směru, můžeme řadu sestavit následovně:

-4211, 76; -3509, 8; -2807, 84; -2105, 88; -1404, 92; -701, 96; 0; 701, 96; 1404, 92; 2105, 88; 2807, 84; 3509, 8

1.3.2 Transpozice do rámce jedné periody

Nyní je nutno čísla upravit tak, aby se nacházela v intervalu $\langle 0; T \rangle$, kde T značí zadanou velikost periody. Zde je nutno myslet algoritmicky; pokud platí, že $H_i < 0$, kde H_i značí hodnotu na určitém indexu, přičteme jednu periodu. Pokud je hodnota stále záporná, postup opakujeme.

Vice versa, pokud $H_i \geq T$, hodnotu jedné periody *odečteme* a postup opakujeme, dokud výsledná hodnota neleží v intervalu $\langle 0; T \rangle$.

Pokud si jako periodu určíme oktávu v poměru $2 : 1$, tedy 1200C, po zpracování řady získané v minulém kroku dostaneme tyto hodnoty:

588, 24; 90, 2; 792, 16; 294, 12; 995, 08; 498, 04; 0; 701, 96; 204, 92; 905, 88; 407, 84; 1109, 8

1.3.3 Seřazení hodnot dle stupně nebo velikosti

Ve výchozím nastavení programu jsou tóny v periodě řazeny podle jejich výšky (nejmenší hodnota odpovídá nejnižšímu stupni v periodě), jak se zdá být intuitivní pro interpretaci na klávesovém nástroji. Existují však zvláštní případy, kdy by správně některé tóny terénu měly zaznít „napřeskáčku“. Proto je nutno implikovat možnost řazení tónů přepnout na alternativní způsob, kdy výška nehraje roli a tóny jsou řazeny podle *stupně*, kterému v soustavě odpovídají.

Pro řazení v závislosti na odpovídajícím stupni je nutno získat počet centů na jeden stupeň systému vztahem $c_1 = \frac{T}{x}$. Poté si vypočteme počet těchto stupňů v zadaném intervalu generátoru vztahem $c_I = \frac{I}{c_1}$. Nyní víme, jaký interval v rámci periody generujeme. Hodnotu zaokrouhlíme a použijeme ji k označení jednotlivých intervalových postupů v periodě např. následovně:

označení	$-c_I \cdot 2$	$-c_I$	0	c_I	$c_I \cdot 2$
výška v centech	$-I \cdot 2$	$-I$	0	I	$I \cdot 2$

Tab. 1.5: Princip řazení tónů podle stupně

Stejně, jako jsme předtím převáděli centové hodnoty do rámce jedné periody, převedeme i označení stupňů. Nutno poznačit, že pokud jsou x a c_I soudělnými čísly, intervaly se začnou přepisovat, což je nežádoucí a tento případ je nutný ošetřit odbočkou, která v takovémto případě seřadí tóny standartně; podle velikosti.

Když následovně seřadíme hodnoty podle označení, která jim byla přidělena, dostaneme při zadání parametrů některého ze zvláštních případů systém s nevzestupným frekvenčním postupem jednotlivých tónů.

Na příkladu, který zde uvádím, dosáhneme použitím libovolného z postupů stejného výsledku, jelikož nepatří mezi temperamenty, při kterých by metoda řazení ovlivnila výsledek. Řada nyní bude vypadat takto:

0; 90, 2; 204, 92; 294, 12; 407, 84; 498, 04; 588, 24; 701, 96; 792, 16; 905, 88; 995, 08; 1109, 8

1.3.4 Aplikování hodnot na zbytek rozsahu a převod na kmitočty

Nyní už máme velikosti všech intervalů v rámci jedné periody určené. Stačí pouze vzít celou řadu a přičítáním či odčítáním periody ode všech hodnot ji transponovat do vyšších či nižších sousedních period. Toto musí být učiněno tolikrát, kolik period se vejde na klaviaturu (v případě softwaru do 128 MIDI adres).

Nyní již musíme vědět, od kterého tónu temperament stavíme. Je zvykem jako výchozí hodnotu používat tzv. *middle C*, tedy jednočárkované C, kterému odpovídá MIDI adresa 60. Použijeme-li ho v příkladu, musíme tedy transpozicemi získat 60 spodních hodnot (0-59) a 67 horních hodnot (61-127).

Pro převedení celého řetězce na kmitočty musíme každou hodnotu získaného řetězce upravit podle vztahu:

$$f_n = f_{poc} \cdot 2^{\frac{c_n}{1200}}$$

kde f_n značí frekvenci na n -tém místě v řetězci, f_{poc} frekvenci výchozího tónu (při $A_1 = 440\text{Hz}$ odpovídá C_1 cca 261,63Hz) a c_n je hodnota n -tého tónu v centech.

Pokud je uživatelem zvolen jako počátek jiný tón, než jednočárkované C, musí být řetězec naplněn od MIDI adresy odpovídající vybranému tónu a při převádění na frekvenci musí být vztahován k příslušnému kmitočtu počátku. Ten můžeme vypočítat dle následujícího vztahu:

$$f_{poc} = 2^{\frac{poc-69}{12}} \cdot 440$$

V rámci aplikace je také možnost určit „offset“ počátečního tónu, tedy jej posunout o maximálně 99C nahoru či dolů. Tento element je možno do výpočtu vsadit přičtením „offsetu“ ke každé centové hodnotě tónu před převedením na kmitočty.

1.4 Temperament ve světě virtuálního nástroje

Virtuální nástroje, jejichž pomocí lze hrát intervaly nacházející se mimo zavedené temperamenty, jsou v podstatě neexistující. Za program s podobnou funkcí by se dal označit snad jen plugin *GalactiX2* od Alexe Kritova [10]. Ten se však více věnuje samotné syntezě výsledného zvuku a možnost nastavit temperament je zde omezena na čtyři presetty a pohyblivý počáteční tón.



Obr. 1.9: Uživatelské prostředí pluginu GalactiX2 [10]

Některé dostupné aplikace umí přeladit svůj temperament načtením souboru s příponou *.tun*, který obsahuje údaje o pozicích jednotlivých tónů. Tyto soubory je možno vytvářet např. pomocí prostředí **Scala**[11]. Není však možné temperament plynule měnit v průběhu hry. Vytváříme zde tedy program, který v tomto okruhu ojedinělým úkazem, a je nutno veškeré algoritmy a funkce navrhnout zcela „od píky“.

1.5 Prostředí, jazyk a knihovny zvolené pro realizaci

Pro realizaci audio aplikací se z mého rešerše ukázal být ideálním jazyk C++. Existuje pro něj navíc množství kódového materiálu v podobě přídatných knihoven určených přímo pro využití v signálovém zpracování, jako například knihovny JUCE [12], které v prototypu programu využívám a díky kladné zkušenosti s nimi tak plánuji pokračovat i v tvorbě výsledné aplikace.

Jedním z požadavků pro finální program je možnost jeho využití i v rámci jiného audio softwaru jako tzv. *plugin*. Tyto aplikace využívají formáty VST2 (*virtual studio*

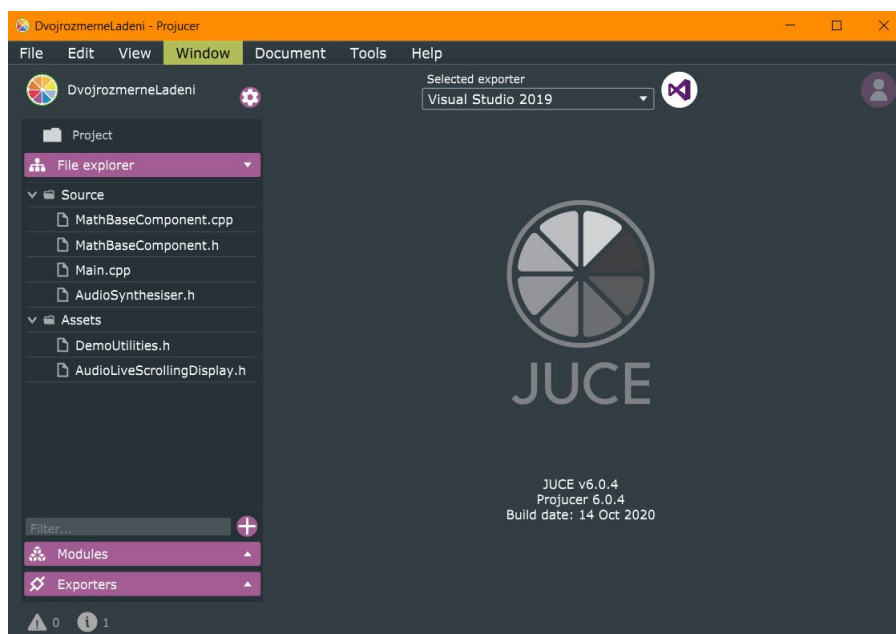
technology), VST3, AU (*audio unit*) nebo AAX (*avid audio extension*). Knihovny JUCE obsahují možnost sestavit program typu plugin jako každý z těchto formátů. Aplikace tedy má existovat jak samostatně, tak ve formátu pluginu, který je možno otevřít ve všech standartně využívaných DAW, např. Cubase, Studio One, Ableton, etc. Pro toto přizpůsobení bylo oproti prototypu vytvořenému v rámci semestrální práce nutno přepracovat vnitřní strukturu kódu, který musí umět komunikovat s vnějším softwarem.

Díky kompatibilitě JUCE s veškerými klasickými operačními systémy (včetně Androidu a iOS) lze uvažovat o budoucích možnostech uzpůsobení samostatné aplikace pro mobilní zařízení.

1.5.1 Práce s JUCE

Spolu se samotnými knihovnami patří k balíčku JUCE také aplikace Projucer [13], která z knihoven automaticky sestaví „kostru“ kódu (tzv. *template*) podle požadavků na její využití (tyto aplikace se označují *code template generator*).

JUCE obsahuje jak funkce pro zpracovávání signálu, tak široké spektrum vizuálních a interaktivních prvků, které lze do programu umístit. Veškerý kód je také pečlivě okomentován, tudíž je v něm dobrá orientace a není pro začínající programátory vyloženě nepřátelský.



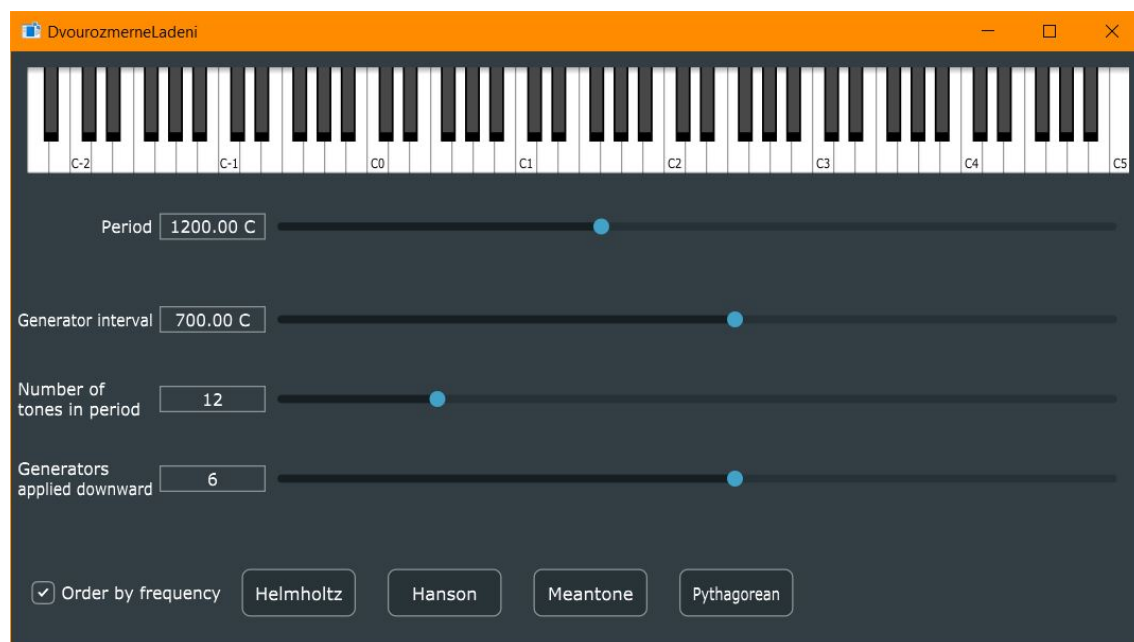
Obr. 1.10: Aplikace Projucer s hierarchií vytvářeného programu

2 Realizace aplikace

V této části nejprve stručně shrnu podobu prototypu, který byl vytvořen v rámci semestrální práce. Následně se budu věnovat aktuální verzi softwaru, jeho hierarchii a funkcím, a nakonec nastíním další možnosti, jak by se dalo ve vývoji aplikace pokračovat v rámci navazujícího magisterského studia.

2.1 Prototyp vytvořený v rámci semestrální práce

Tato verze obsahovala základní funkce aplikace a fungovala pouze ve *standalone* podobě. Uživatel mohl nastavit čtyři základní parametry a způsob řazení tónů v periodě. Bylo možno zvolit mezi čtyřmi přednastavenými temperamenty. Syntetizovaným zvukem byla sinusová vlna. Aplikaci bylo možno ovládat pomocí MIDI vstupu nebo virtuální klaviatury na obrazovce.



Obr. 2.1: Prototyp aplikace z prosince 2020

Hierarchie aplikace obsahovala pouze čtyři složky zdrojového kódu. Převážná část procesů se odehrávala v třídách obsahujících funkci syntezátoru a matematickou funkci pro výpočet frekvence aktuálně spouštěného tónu.

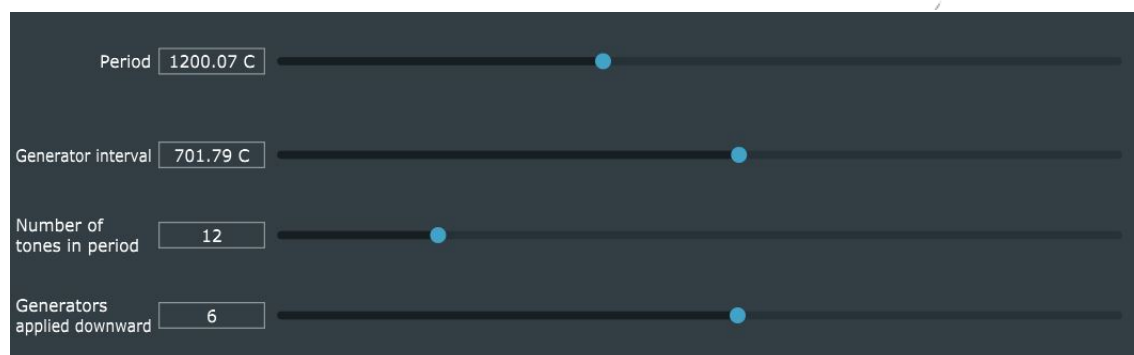
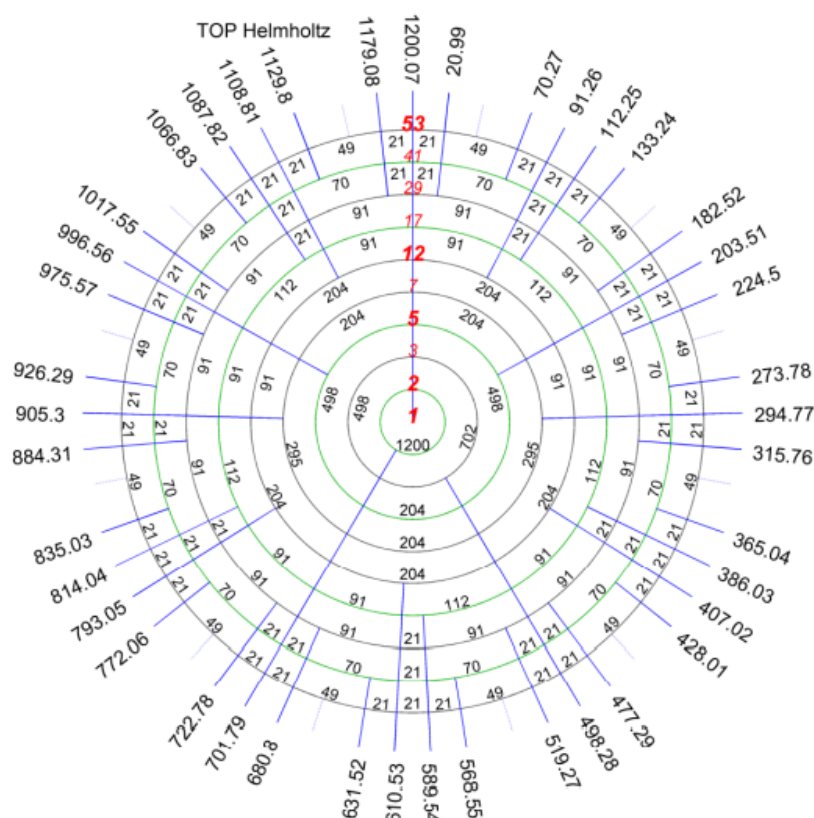
Struktura kódu se od aktuálního prototypu zásadně liší, bylo totiž nutné celou aplikaci přepsat pro umožnění použití v rámci DAW. Součástí však zůstaly čtyři presety v prototypu obsažené.

2.1.1 Původní presety

Schismatické ladění

Tento tónový systém, jehož pětlimitová podoba se také nazývá *Helmholtz*, patří do rodiny schismatických systémů [14]. Temperovaným kommatem je $\frac{32805}{32768}$, což je rozdíl vzniklý mezi čistou tercií v JI a zmenšenou kvartou v historickém ladění pythagorejském. Kvinta je zde lehce snížena oproti JI. Parametry tohoto temperamentu jsou:

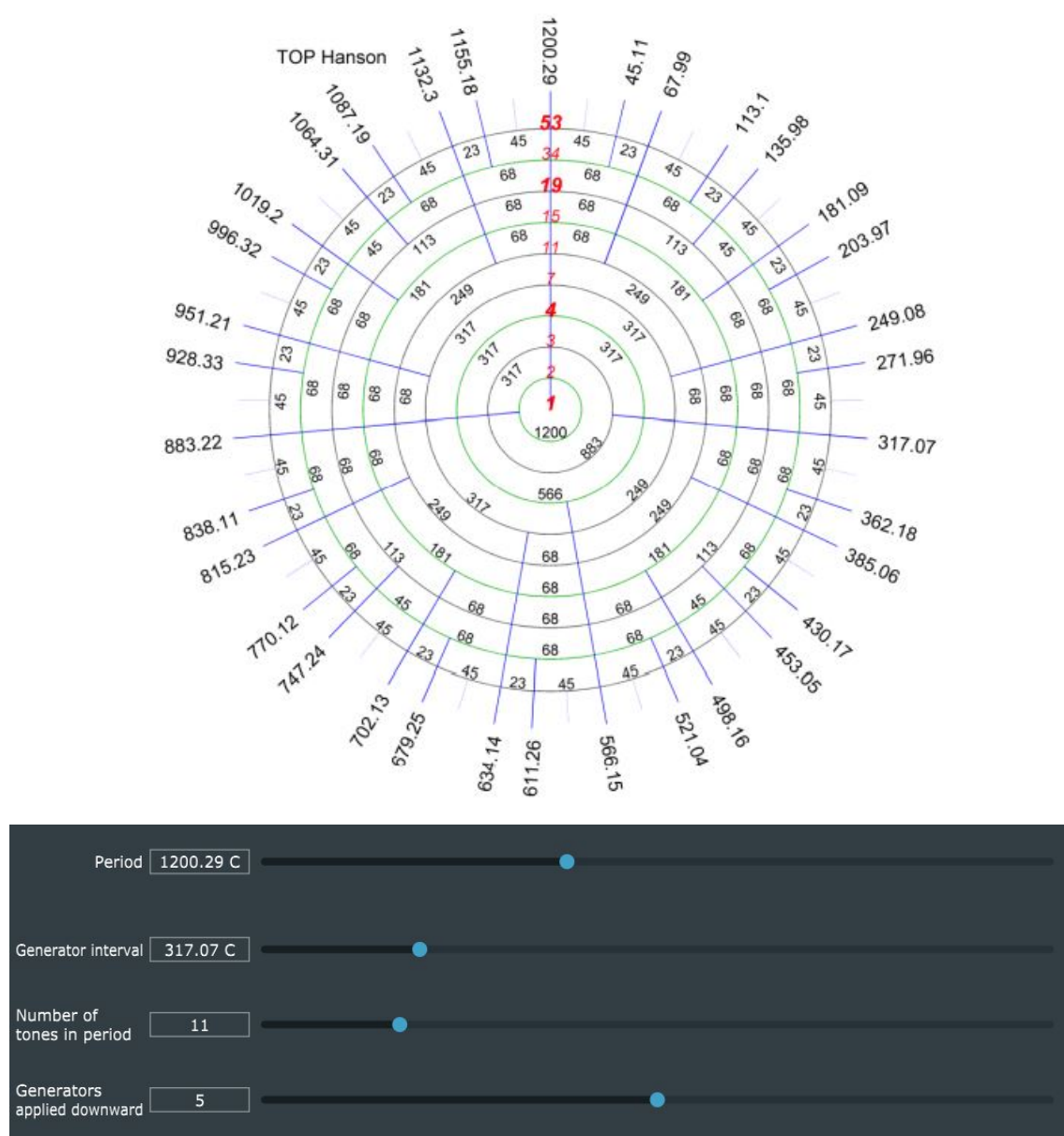
$$T = 1200,07; I = 701,79; x = 12; z = 6.$$



Obr. 2.2: Horagram ladění TOP Helmholtz dle P. Erlicha [1]

Ladění Hanson

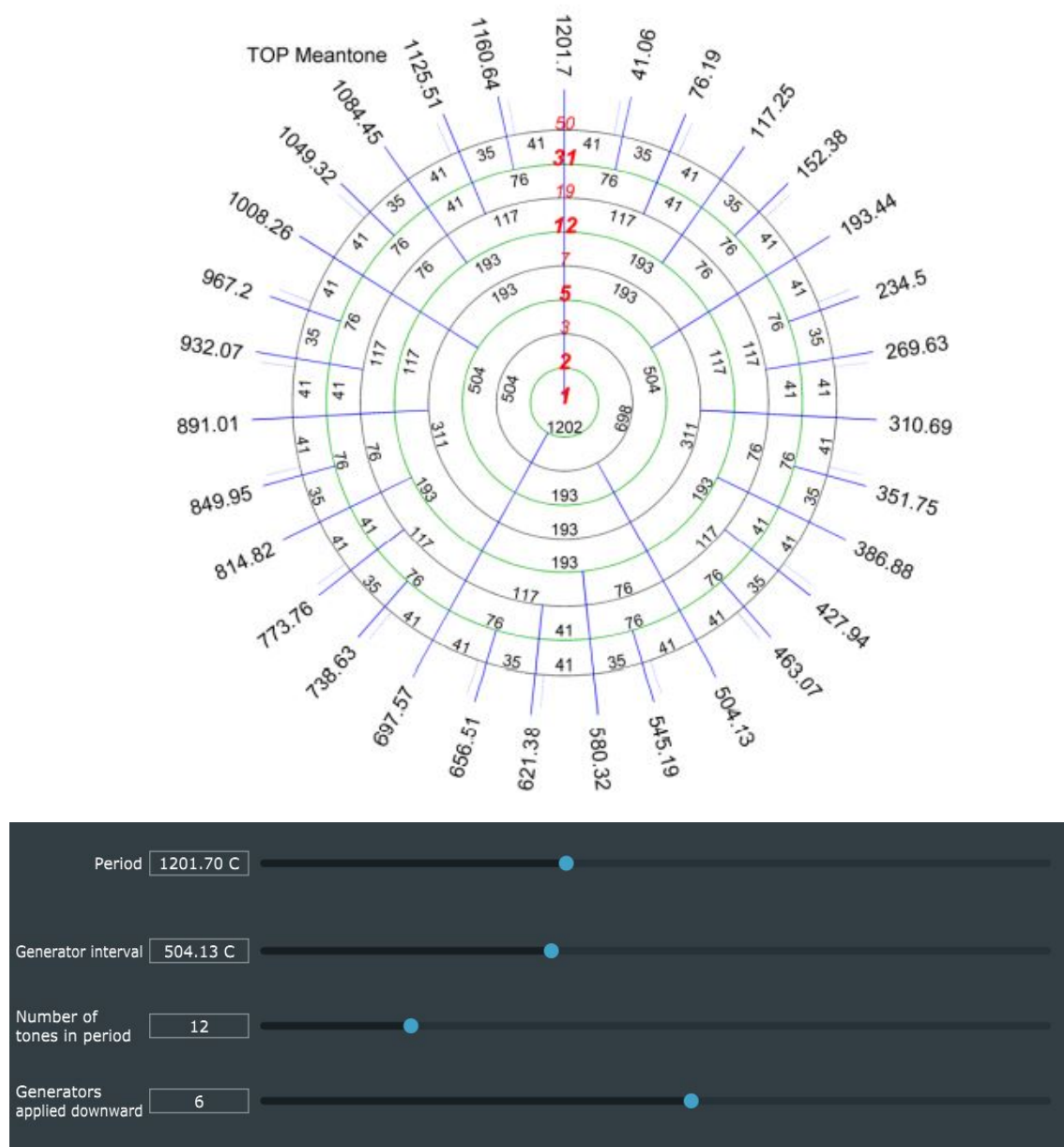
Jedná se o temperament z kleismické rodiny systémů [14]. Využívá jako generátor rozšířenou malou tercii a jeho experimentálním záměrem je aproximace znějící kvinty pro vytemperování kommatu $\frac{15625}{15552}$. Tento systém je neslučitelný s klasickým notovým zápisem. Také je kvůli svým vnitřním zákonitostem méně vhodný pro nastavení $x = 12$ a plní svou práci lépe při hodnotách 7, 11, 15 či 19. Pro účely demonstrace používám variantu $x = 11$. Parametr y zvolil P. Erlich oproti trendu v hodnotě 5. Další parametry jsou nastaveny na $T = 1200,29$ a $I = 317,07$.



Obr. 2.3: Horagram ladění TOP Hanson dle P. Erlicha [1]

Středotónové ladění

Toto ladění je jedním z nejznámějších historických tónových terénů. Bývá generováno kvartou či kvintou a jeho účelem je eliminování tzv. *syntonického komma* o velikosti $\frac{81}{80}$, které vzniká mezi dvěma variantami získání intervalu malé tercie (dle poměru vyšších harmonických složek 5 : 4 a kvintovými postupy $\frac{81}{64}$). Tohoto ladění se v Evropě široce využívalo v praxi mezi 15. a 18. stoletím [14], vymizelo až s nástupem rovnoměrně temperovaného ladění.



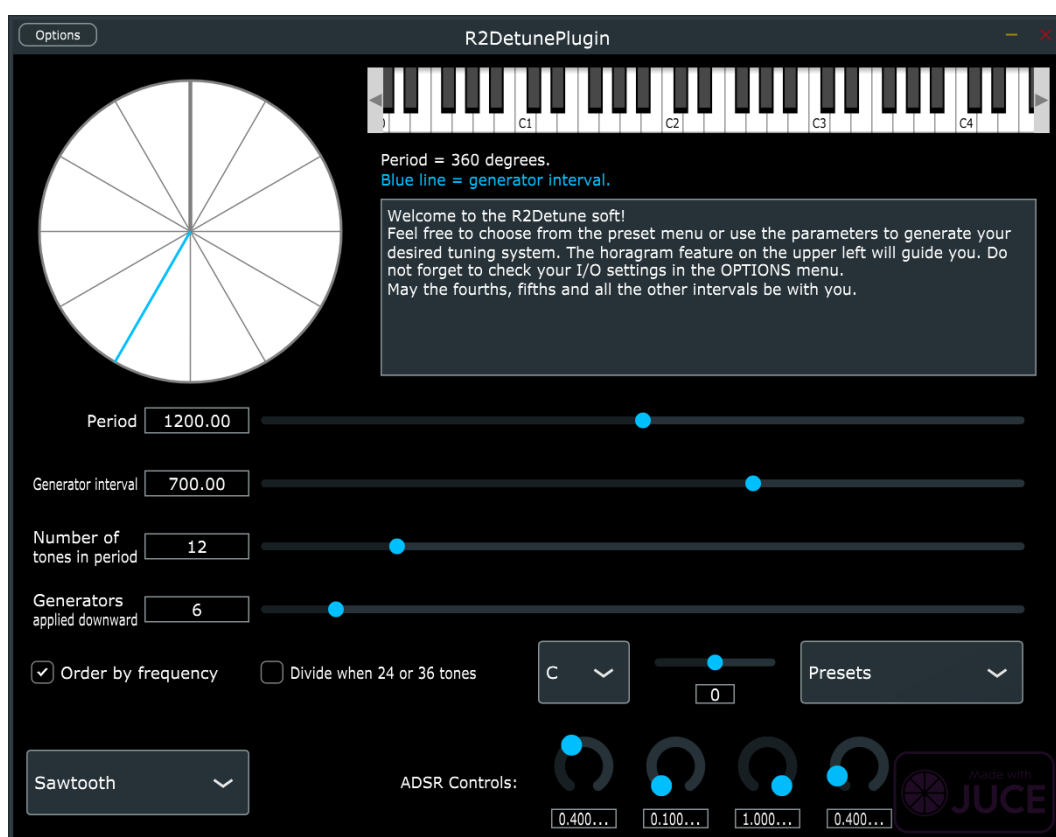
Obr. 2.4: Horagram ladění TOP Meantone dle P. Erlicha [1]

Pythagorejské ladění

Vzhledem k Erlichovu využití pythagorejského ladění pro demonstraci matematických zákonitostí v dvourozměrných ladících systémech [1] uvádím tento klasický temperament založený na přirozených intervalech také jako jeden z presetů programu. Jak už bylo dříve uvedeno v kapitole o matematických zákonitostech (1.3.1), oktáva je zde v poměru 2 : 1, tedy 1200 centů. Generátorem je čistá kvinta o velikosti 701,96 centů. (Graf pythagorejského ladění byl již uveden v sekci o horagramu 1.8.)

2.2 Aktuální verze aplikace

Oproti prototypu se již jedná o program s poměrně rozsáhlou strukturou. Jednotlivé funkce byly pro přehlednost rozděleny do oddělených souborů a propojeny skrze systém provázaných hodnot *AudioProcessorValueTreeState*. Aplikace funguje jak ve *standalone* verzi, tak ve formátu VST3 jako *plugin* v rámci DAW. Na základě připomínek od pana MgA. Petra Pařízka, Ph.D. byla provedena řada úprav co se týče možností zadávání parametrů a funkcí pro alternativní rozložení tónů v rámci klaviatury.

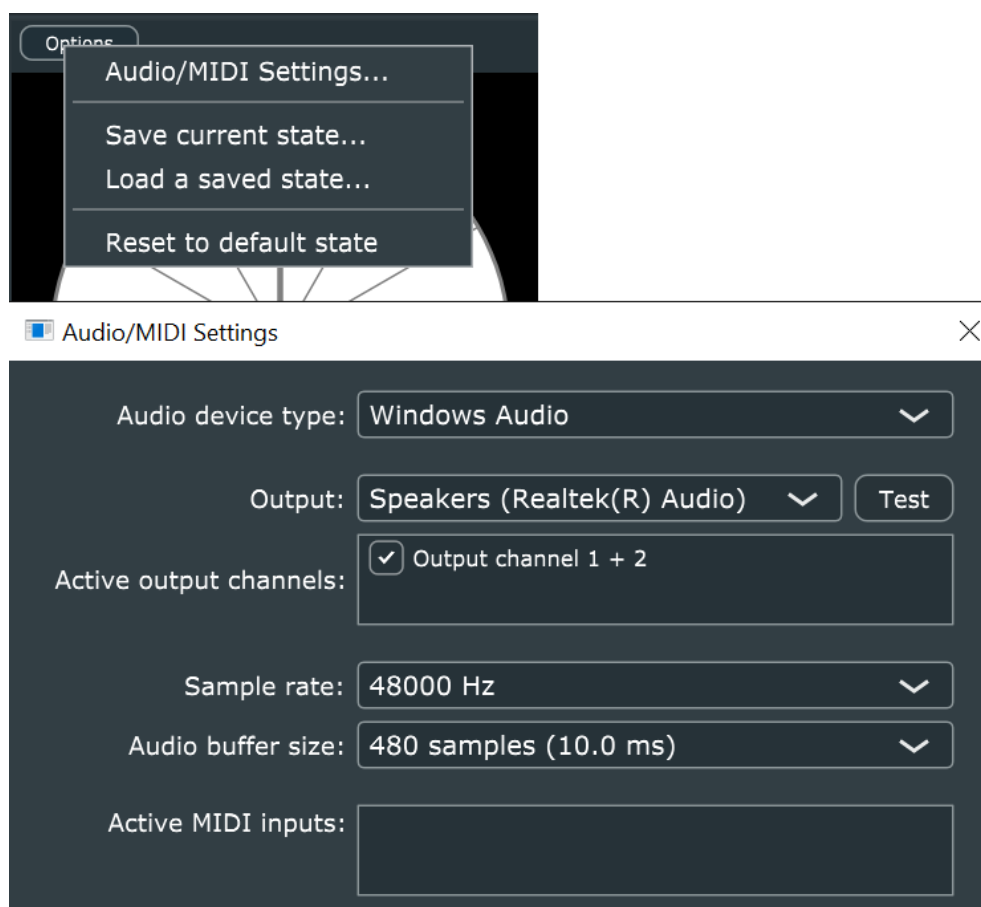


Obr. 2.5: Uživatelské prostředí aplikace

2.2.1 Ovladatelné prvky aplikace

Okno aplikace má v levé části horní lišty tlačítko „Options“. Zde lze pod odrážkou *Audio/MIDI Settings* nastavit Audio a MIDI vstupy a výstupy nebo vzorkovací frekvenci a velikost bufferu. Dále jsou zde připravená tlačítka pro ukládání stavu aplikace. Tady by později mohla být možnost uložit temperament ve formátu *.tun* pro použití v již existujících aplikacích, které tento formát umějí otevírat. Nakonec se v menu nachází tlačítko pro resetování hodnot do výchozího stavu.

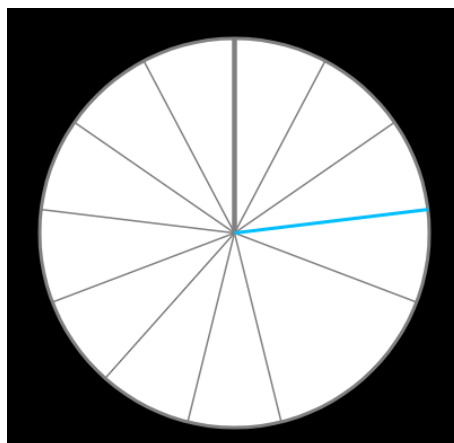
Toto menu je viditelné pouze ve standalone verzi. Ve verzi pluginu aplikace funguje dle nastavení hostitelského DAW.



Obr. 2.6: Obsah menu „Options“

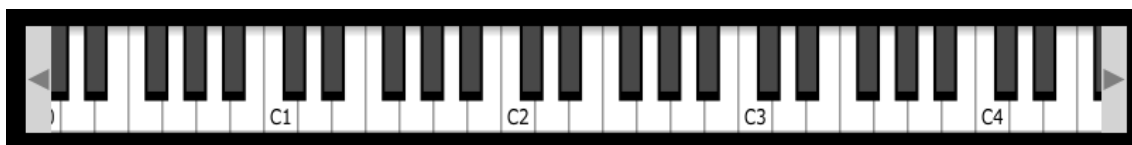
V levém horním rohu vidíme zjednodušenou verzi horagramu. Ten se aktualizuje s každou změnou parametrů a slouží k ilustraci struktury vytvářeného temperamentu ještě než zazní zvukově. Můžeme na něm také pozorovat vliv jednotlivých proměnných na výslednou podobu tónového terénu.

Tlustá čára značí počátek, modrá čára odpovídá intervalu generátoru v poměru k periodě a tenké šedé čáry odpovídají vygenerovaným stupňům.



Obr. 2.7: Prvek zjednodušeného horagramu

V pravém horním rohu okna je virtuální klaviatura. Tento prvek umožňuje vyzkoušení programu i v případě, že není dostupný žádný MIDI vstup. Zároveň na ní při použití MIDI kontroleru, který není konstruovaný v podobě klaviatury, můžeme vizuálně sledovat, která MIDI adresa je zrovna spouštěna (příslušné klávesy se při hraní rozsvěcejí).



Obr. 2.8: Virtuální klaviatura

Pod klaviaturou se nachází pole s pomocným textem, které mění svůj obsah dle stisknutých voleb.

Dále vidíme čtyři slidery odpovídající základním parametrům. Oproti minulému prototypu aplikace lze interval generátoru zadávat i v záporných hodnotách (směr generátoru se tak obrátí).



Obr. 2.9: Parametrové slidery

Následuje řádek přídatných funkcí aplikace. Vidíme zde zaškrtačací políčka „Order by frequency“ a „Devide when 24 or 36 tones“. První políčko určuje, zda jsou tóny řazeny dle stupně nebo frekvence (rozebíráno blíže v části 1.3.3). Druhé zapíná přízpůsobení klávesnice pohodlnější hře v případě, kdy je počet tónů v periodě 24 nebo 36. Při zaškrtnutí této volby je prvních 12 stupňů naplněno pouze lichými tóny a druhých 12 stupňů sudými v případě 24 tónů a v případě 36 tónů se stupně rozdělí logikou ABC-ABC-ABC-[...]. Tato volba umožňuje lepší orientaci na klaviatuře pro interpretaci mikrotonálních notových zápisů.

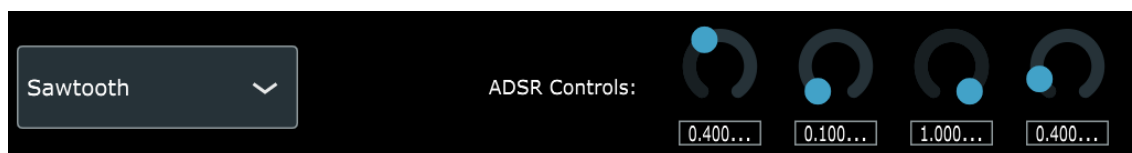
Dále můžeme vidět rozbalovací menu, ve kterém si volíme počáteční tón. Na výběr máme z tónů obsažených v rovnoměrně temperované jednočárkované oktávě. Svůj výběr však můžeme ještě upřesnit nastavením centového posunu pomocí posuvníku napravo od menu, a to v hodnotách od -99C do 99C .

Na pravé straně tohoto řádku se nachází menu s presety. Těch je nyní patnáct a budu se jim nadále věnovat v příslušné sekci.



Obr. 2.10: Řádek přídatných funkcí

Ve spodní části okna se nachází řádek nastavení syntezátoru. Je možno si zvolit mezi pilovým, sinusovým a obdélníkovým průběhem a posléze nastavit jejich ADSR parametry (Attack, Decay, Sustain a Release).

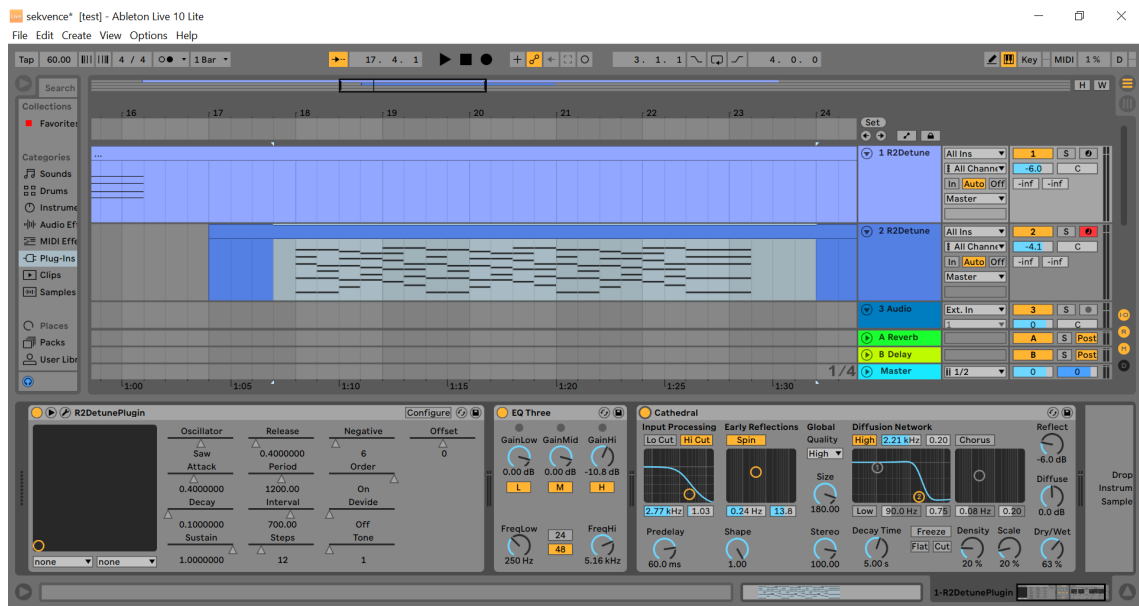


Obr. 2.11: Řádek nastavení syntezátoru

2.2.2 Fungování v rámci DAW

Program vypadá ve své VST3 formě téměř shodně. Chybí jen menu „Options“ s nastavením vstupů a výstupů. Při minimalizaci okna pluginu lze nadále upravovat parametry automatizací či zmenšeným ovládáním (např. v prostředí Ableton).

Zvuk pluginu je možno nadále upravovat pomocí libovolných MIDI i audio efektů jejich přidáním do stopy.

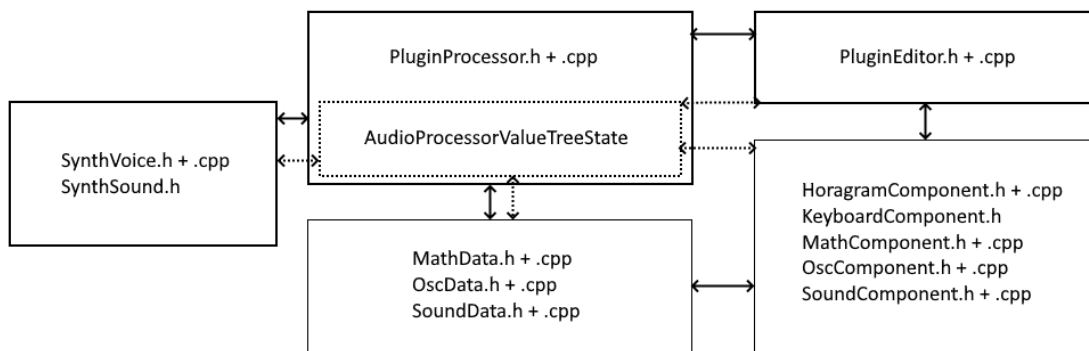


Obr. 2.12: Minimalizovaný plugin v DAW Ableton Live 10 Lite

2.2.3 Struktura kódu

Pro přehlednost byl kód dle funkce rozdělen do částí. Jednotlivé části spolu sdílí hodnoty globálních proměnných přes funkci *AudioProcessorValueTreeState*. Takto na sebe jednotlivé komponenty mohou v reálném čase reagovat aniž by byly přímo propojeny. Kód dělím následujícím způsobem:

1. Rámcový kód aplikace
 - 1.1. PluginProcessor.h + .cpp (hlavní funkční rámec)
 - 1.2. PluginEditor.h + .cpp (hlavní rámec pro UI)
2. Syntezátor
 - 2.1. SynthVoice.h + .cpp (zápis do bufferu)
 - 2.2. SynthSound.h (propojení syntezátoru s hlavním rámcem)
3. UI komponenty
 - 3.1. HoragramComponent.h + .cpp (komponent horagramu)
 - 3.2. KeyboardComponent.h (virtuální klaviatura)
 - 3.3. MathComponent.h + .cpp (ovládání parametrů a presetů)
 - 3.4. OscComponent.h + .cpp (menu pro výběr oscilátoru)
 - 3.5. SoundComponent.h + .cpp (ovládání ADSR)
4. Zpracování dat
 - 4.1. MathData.h + .cpp (výpočet tónového terénu)
 - 4.2. OscData.h + .cpp (definice průběhu vlny)
 - 4.3. SoundData.h + .cpp (definování ADSR funkcí)



Obr. 2.13: Blokové schéma programu

2.2.4 Algoritmizace matematického základu

Matematické zákonitosti (zpracovány v sekci 1.3.1) bylo potřeba převést do podoby fungujícího algoritmu. Ten se nachází v části MathData.h + .cpp a na základě vstupních parametrů je jeho výstupem frekvence aktuálně spouštěného tónu. Tato část kódu je „duší“ celého programu. Jejímí vstupními hodnotami jsou:

int *midi* ... číslo spuštěné klávesy
 float *T* ... velikost periody v centech
 float *I* ... interval generátoru v centech
 int *x* ... počet tónů v periodě
 int *z* ... počet záporných kroků generátoru
 bool *radime* ... volba řazení tónů
 bool *delime* ... volba rozložení klaviatury
 int *ton* ... počáteční tón temperamentu
 int *centy* ... „offset“ počátečního tónu

Nejprve je potřeba v případě záporného intervalu generátoru obrátit směr procesu generování stupňů.

```

if (I < 0) {
  while (I < 0) {
    I = I + T;
  }
  z = x - z - 1;
}

```

Obr. 2.14: Úprava záporného intervalu generátoru

Nyní aplikováním generátoru získám řadu hodnot.

```
MATRIX[z] = 0;
int y = z;
while (y <= (x) && y < MAT_SIZE && y >= 0) {
    y++;
    MATRIX[y] = MATRIX[y - 1] + I;
}
y = z;
while (y >= 0) {
    y--;
    MATRIX[y] = MATRIX[y + 1] - I;
}
```

Obr. 2.15: Získání řady hodnot

Podle zvoleného způsobu řazení (boolean *radime*) provedeme jednu z možných variant. Pokud je zvoleno řazení podle velikosti nebo je při řazení podle stupně spuštěna výjimka (ošetřující situaci, kdy jsou x a index stupně intervalu generátoru soudělná čísla), provede se tento úkon:

```
if (radime) {
    for (int i = 0; i < x; i++) {
        while (MATRIX[i] < 0) {
            MATRIX[i] = MATRIX[i] + T;
        }
        while (MATRIX[i] >= T) {
            MATRIX[i] = MATRIX[i] - T;
        }
    }

    for (int i = 0; i < x - 1; i++)
    {
        for (int j = i + 1; j < x; j++)
        {
            if (MATRIX[i] > MATRIX[j])
            {
                tempD = MATRIX[i];
                MATRIX[i] = MATRIX[j];
                MATRIX[j] = tempD;
            }
        }
    }
}
```

Obr. 2.16: Řazení podle velikosti

V případě řazení dle stupně se provede následující akce:

```

else {
    int STUPNE[64]{ 0 };
    int edo = T / x;
    int stup = (I / (T / x)) + 0.5;
    int j = 0;

    for (int i = (-z); j < x; i++) {
        STUPNE[j] = i * stup;
        j++;
    }

    for (int i = 0; i < x; i++) {
        while (STUPNE[i] < 0) {
            STUPNE[i] = STUPNE[i] + x;
        }
        while (STUPNE[i] >= x) {
            STUPNE[i] = STUPNE[i] - x;
        }
    }

    for (int i = 0; i < x; i++) {
        while (MATRIX[i] < 0) {
            MATRIX[i] = MATRIX[i] + T;
        }
        while (MATRIX[i] >= T) {
            MATRIX[i] = MATRIX[i] - T;
        }
    }

    for (int i = 0; i < x - 1; i++)
    {
        for (int j = i + 1; j < x; j++)
        {
            if (STUPNE[i] > STUPNE[j])
            {
                tempD = MATRIX[i];
                MATRIX[i] = MATRIX[j];
                MATRIX[j] = tempD;
                int tempI = STUPNE[i];
                STUPNE[i] = STUPNE[j];
                STUPNE[j] = tempI;
            }
        }
    }
}

```

Obr. 2.17: Řazení podle stupně

Budeme nyní uvažovat, že hodnota $poc_{temp} = poc = 60 + ton - 1$, přičemž v hodnotě ton je uloženo číslo v hodnotě 1-12, kde 1 odpovídá tónu C a 12 tónu H. Pokud je uživatelem zakliknuta možnost alternativního rozložení klaviatury, můžeme v případě, kdy $x = 24$ postupovat způsobem uvedeným na obr. č. 2.18. Pokud $x = 36$, proces bude obdobný, perioda se jen rozdělí do tří oktáv místo dvou.

```

if (x == 24 && delime) {
    for (int j = 0; poctemp < 128; j++) {
        for (int i = 0; i < x; poctemp++) {
            MIDI[poctemp] = MATRIX[i] + j * T;
            MIDI[poctemp + (x / 2)] = MATRIX[i + 1] + j * T;
            i = i + 2;
        }
        poctemp = poctemp + (x / 2);
    }

    poctemp = poc - 1;
    for (int j = -1; poctemp >= 0; j--) {
        for (int i = x; i > 0; poctemp--) {
            MIDI[poctemp] = MATRIX[i - 1] + j * T;
            MIDI[poctemp - (x / 2)] = MATRIX[i - 2] + j * T;
            i = i - 2;
        }
        poctemp = poctemp - (x / 2);
    }
}

```

Obr. 2.18: Alternativní rozložení klaviatury

Při běžném rozložení budou hodnoty získány následovně:

```

else {
    for (int j = 0; poctemp < 128; j++) {
        for (int i = 0; i <= x && poctemp < 128; i++ && poctemp++) {
            MIDI[poctemp] = MATRIX[i - 1] + j * T;
        }
    }
    poctemp = poc - 1;
    for (int j = -1; poctemp >= 0; j--) {
        for (int i = x; i >= 0 && poctemp >= 0; i-- && poctemp--) {
            MIDI[poctemp] = MATRIX[i - 1] + j * T;
        }
    }
}

```

Obr. 2.19: Běžné rozložení klaviatury

Nakonec je podle nastaveného počátečního tónu převedena celá matice na kmitočty. Návratovou hodnotou procesu je proběhlým procesem vypočtená frekvence hrané noty pod adresou *midi*. Nyní je i ke každé centové hodnotě v matici připočten „offset“ počátečního tónu zadaný uživatelem.

```

double pocf = (pow(2, (((double)poc - 69) / (double)12))) * 440;

for (int m = 0; m <= 127; m++) {
    double exp = (MIDI[m] + centy) / (double)1200;
    tempD = pow(2, exp);
    MIDIIf[m] = (pocf * tempD);
}

frekvence = MIDIIf[midi];
return frekvence;

```

Obr. 2.20: Převedení hodnot na kmitočty

2.2.5 Katalog přidanych presetů

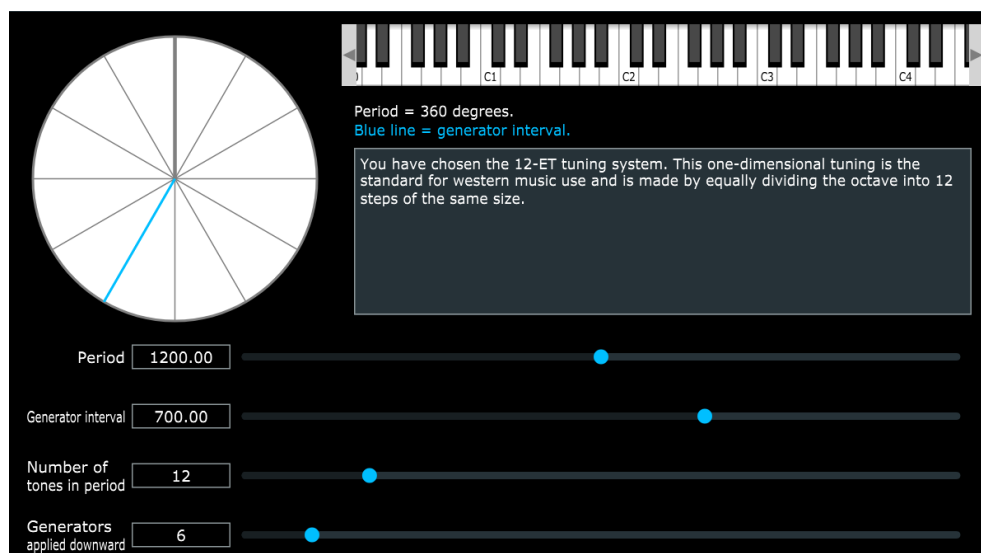
K čtyř presetům zmíněným v části 2.1.1 bylo přidáno dalších jedenáct. Jedná se (kromě dvou rovnoměrných temperamentů) o Erlichova TOP ladění, která zmiňuje ve své práci[1]. Do budoucna program může obsahovat mnoho dalších přednastavených temperamentů, spatřuji však daleko větší potenciál v tom, že si uživatel může nastavit naprosto libovolný dvourozměrný temperament sám, když zná potřebné parametry nebo si vymyslí své vlastní.

Mnoho užitečných informací ohledně tvorby tónových terénů se dá najít na stránce *Xenharmonic Wiki* [14], která slouží jako veřejná knihovna informací o temperamentech a ladění. Na tuto stránku přispívá řada světových odborníků včetně P. Erlicha nebo P. Pařízka.

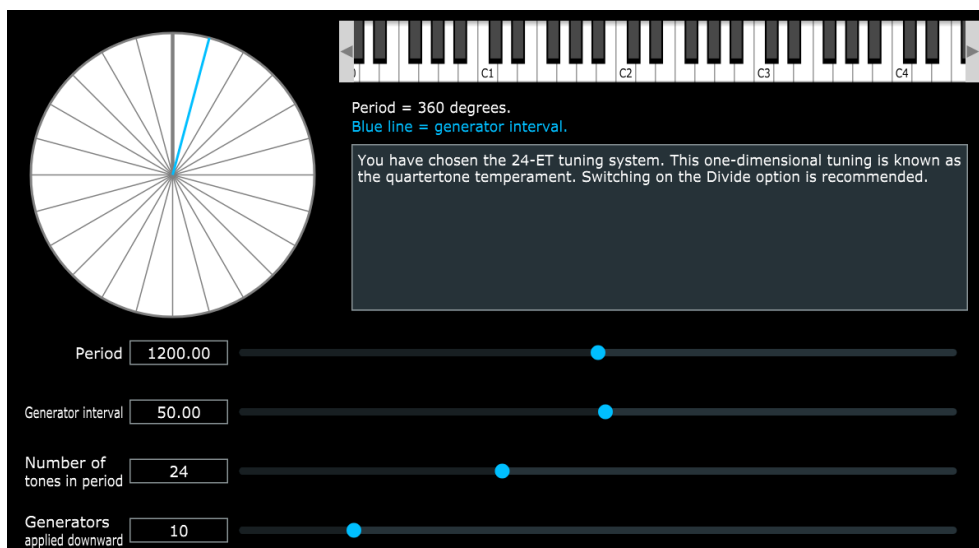
12-ET a 24-ET

Rovnoměrná ladění o 12 a 24 stupních se řadí mezi temperameny jednorozměrné, jsou však mezi presety zařazena jakožto výchozí body pro vytváření temperamentů o shodném počtu stupňů.

Na temperamentu 24-ET je také možno dobře se seznámit s charakterem alternativního rozložení klaviatury, kdy máme v tomto případě vždy vedle sebe dvě oktávy znějící jako temperované ladění o 12 stupních, jedna je však vždy posunuta o čtvrttón, tedy 50 centů, výše. Je proto možno uvažovat o interpretaci skladeb psaných pro rovnoměrně temperovanou čtvrttónovou soustavu pomocí této aplikace.



Obr. 2.21: Dvanáctitónové rovnoměrně temperované ladění



Obr. 2.22: Dvaceti-čtyřtónové rovnoměrně temperované ladění

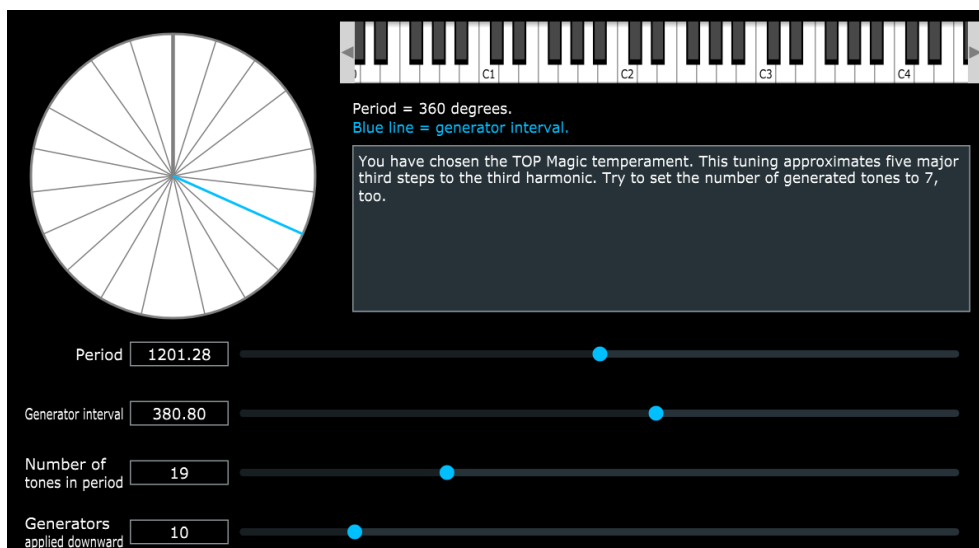
V příloze práce, která obsahuje zvukový soubor ke každému z presetů, v případě ladění 24-ET zařazují i krátkou ukázkou jeho využití v současné době. Po základním porovnání stupňů s 12-ET uslyšíte šest taktů vokální skladby *Moon River* [15] v aranži od Jacoba Coliera [16], kde dochází k modulaci z A-dur do Dis-dur snížené o čtvrttón.

TOP Magic

Temperament zvaný Magic upravuje výšku velké tercie tak, aby zaniklo komma o velikosti $\frac{3125}{3072}$, které vzniká srovnáním pěti kroků o velikosti velké tercie (v JI) se třetí harmonickou složkou. Tradičně je při zachování oktávy definován generátorem o intervalu 380C [14].

Tento temperament, jako mnoho jiných, které budou uvedeny, je nejčastěji využíván pro účely experimentální hudby. Na *Xenharmonic Wiki* je možné dohledat nahrávky. Většina z nich však odpovídá konstrukci o sedmi nebo dvanácti generovaných tónech přičemž jedna z verzí tónového terénu nese název „Muggles“, tedy „Mudlové“. Erlich jako vhodný počet stupňů své TOP verze, ve které je temperována i oktáva a celková struktura se tedy lehce mění, udává 19.

Mimo konkrétní vygenerování tohoto temperamentu lze jeho sedmitónovou verzi použít selekcí požadovaných kláves z rovnoměrně temperovaného ladění 19-ET. Většina starších interpretací ladění Magic vznikla přesně tímto způsobem.

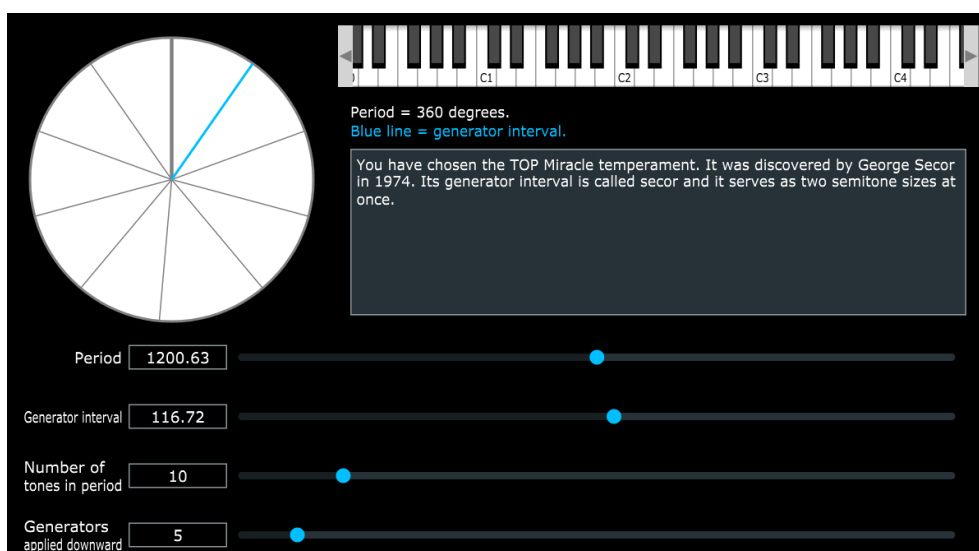


Obr. 2.23: TOP Magic

TOP Miracle

Toto ladění bylo objeveno v roce 1974 Georgem Secorem [14], který jako interval generátoru využil hodnotu mezi $\frac{15}{14}$ a $\frac{16}{15}$. Tento interval byl po svém tvůrci nazván „secor“. Mezi jeho podtypy patří také stupnice *Blackjack* nebo *Blackwoo*.

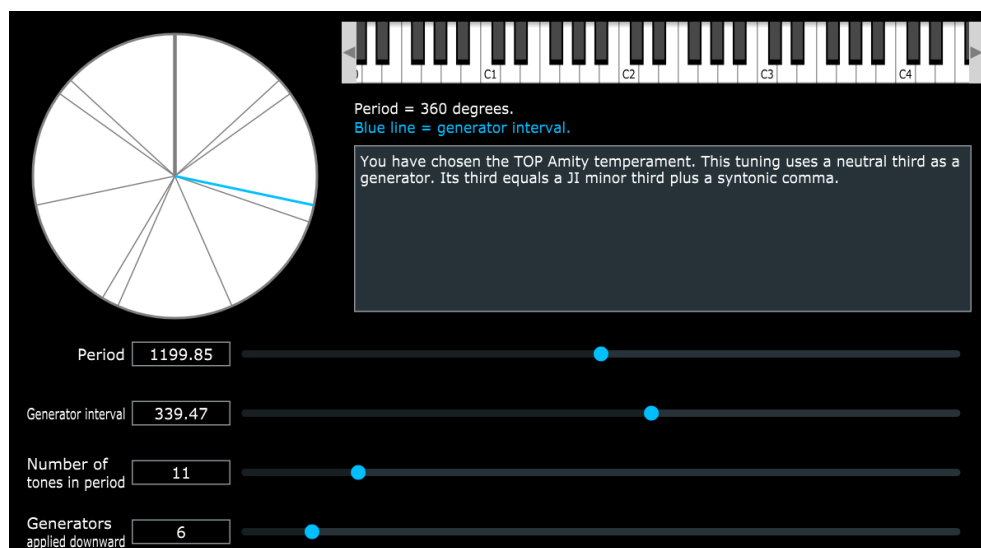
Ve své desetitónové verzi je tento temperament označován jako „cluster“. Tímto pojmem je ilustrován fakt, že tónový terén *téměř* obsahuje *MOS*, tedy *Moment of Symmetry*, jak je označován interval rozdělující pravidelně periodu temperamentu.



Obr. 2.24: TOP Miracle

TOP Amity

Generátorem tohoto ladění je malá tercie zvýšená o syntonické komma [14]. Je jedním z temperamentů obsahujících tzv. *neutrální tercii*, tedy tercii, která se pohybuje v rozmezí mezi malou a velkou. V angličtině se interval nazývá *acute minor third*, z čehož název ladění pochází (a-mi-t-y). Temperamenty z této rodiny vznikají eliminací amity kommatu o velikosti $\frac{1600000}{1594323}$.

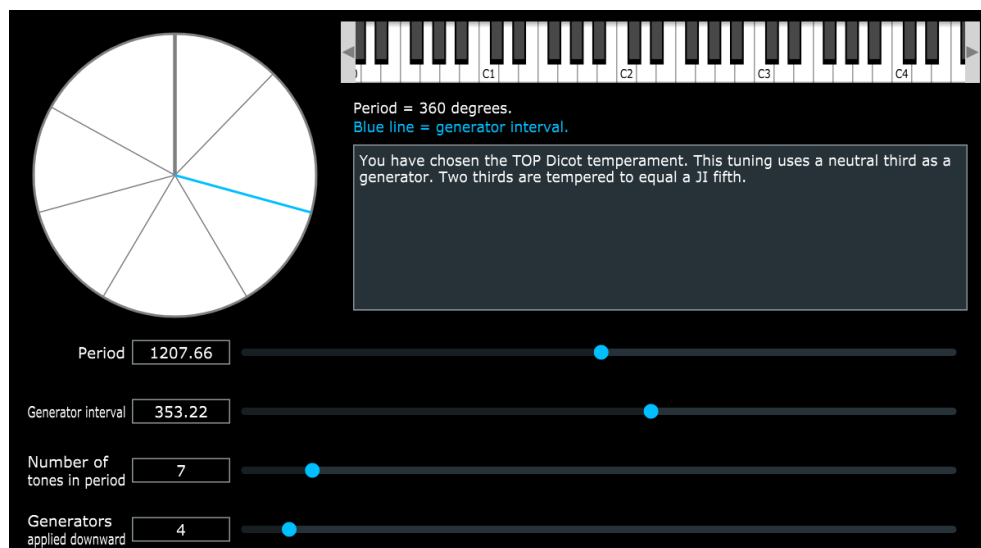


Obr. 2.25: TOP Amity

TOP Dicot

V tomto temperamentu je rovněž použito *neutrálních tercií*, tentokrát jsou však temperovány takovým způsobem, aby se dvě tercie rovnaly přirozené kvintě. Intervalem, který při temperování zaniká, je $\frac{25}{24}$. Jedná se o jeden z tzv. *exotemperamentů*, což jsou ladění, která vznikají temperováním poměrně velkých a nekomplexních kommat. Jsou tak protikladem k *mikrotemperamentům*, které temperují malá a komplexní kommata.

Exotemperamenty se většinou již odprošťují od snahy zakládat se na přirozených intervalech J1, která je v běžných ladících systémech vždy alespoň částečně k nalezení. Dalším známým exotemperamentem je např. *Father*.



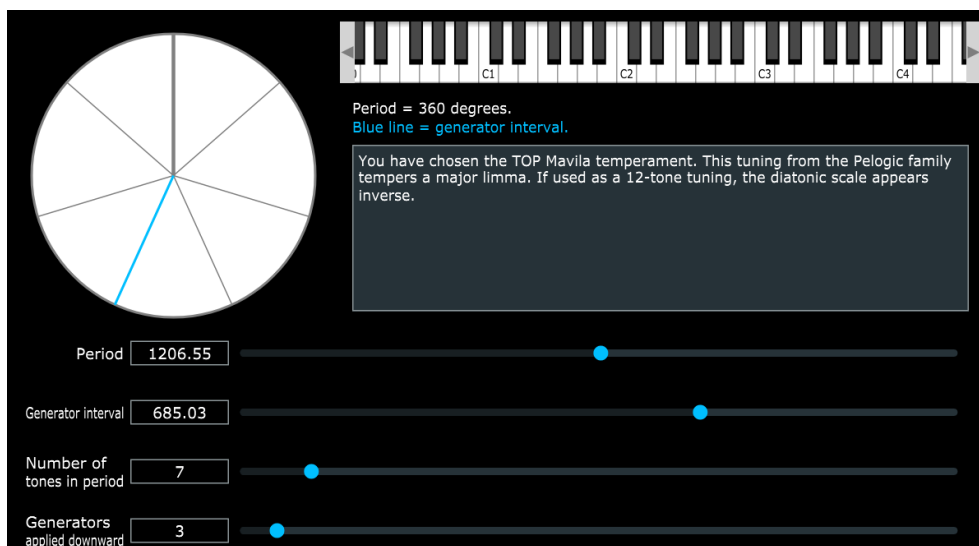
Obr. 2.26: TOP Dicot

TOP Mavila

Tento temperament se řadí do tzv. *Pelagic* rodiny [14]. Je vytvořen temperováním *limmy* 1.1.3. V diatonických stupnicích tvořených v tomto temperamentu se objevuje inverzní rozložení krátkého a dlouhého kroku. Takovéto stupnice mohou být také nazývány *anti-diatonické* nebo *shadow scales*, tedy *stínové stupnice*.

Ladění Mavila je založeno na reálně využívané tonalitě domorodých obyvatel Mosambiku. Členové kmene Chopi jej využívají pro interpretaci své lidové hudby zvané „Timbila“. Harmonická struktura domorodé hudby byla poprvé zmapována hudebním teoretikem Ervem Wilsonem [17]. Zařadil tento temperament po boku Indonéských temperamentů *pelog*, jelikož má velmi podobnou tonální strukturu, přestože se národy historicky nemohly navzájem kulturně ovlivnit.

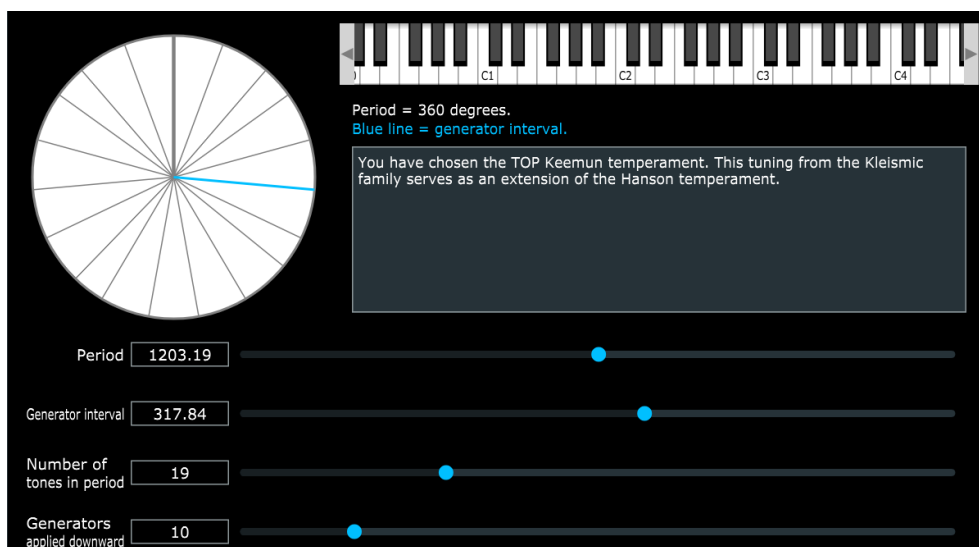
Anti-diatonické temperamenty obsahují mnoho možností pro využití alternativních modálních harmonií. *Stínové stupnice* jdou totiž vytvořit nejen ke klasické durové nebo mollové diatonice, ale i k jakémukoliv běžnému modu. Výsledek teoretici pojmenovávají stejně jako odpovídající původní mod, pouze přidávají přízvisko „anti-“.



Obr. 2.27: TOP Mavila

TOP Keemun

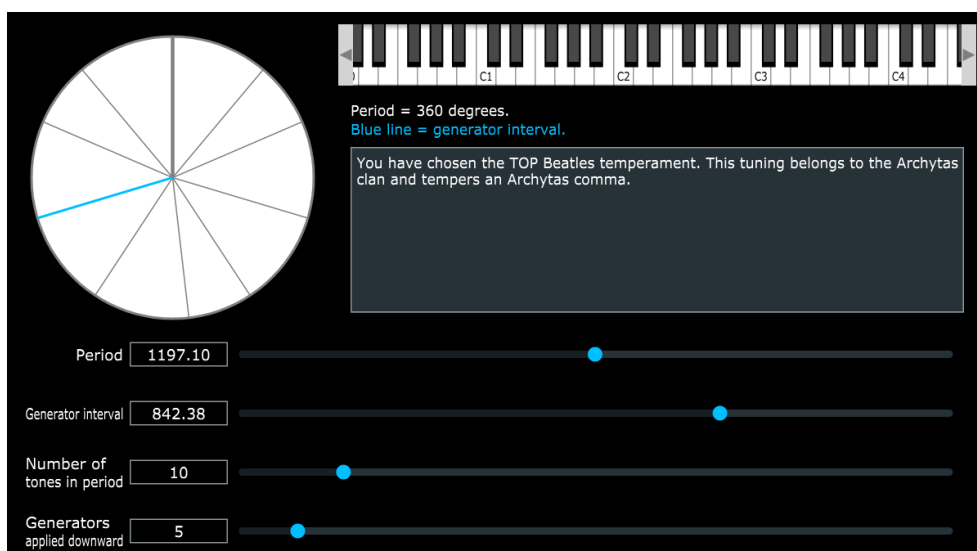
Toto ladění je součástí kleismické rodiny temperamentů [14] stejně jako ladění Hanson 2.3. Dá se považovat za jeho rozšíření a alteraci temperováním dodatečných kommat. Základním prvkem této skupiny ladění je však vždy zanikající komma nazývající se *kleisma*, které odpovídá poměru $\frac{15625}{15552}$.



Obr. 2.28: TOP Keemun

TOP Beatles

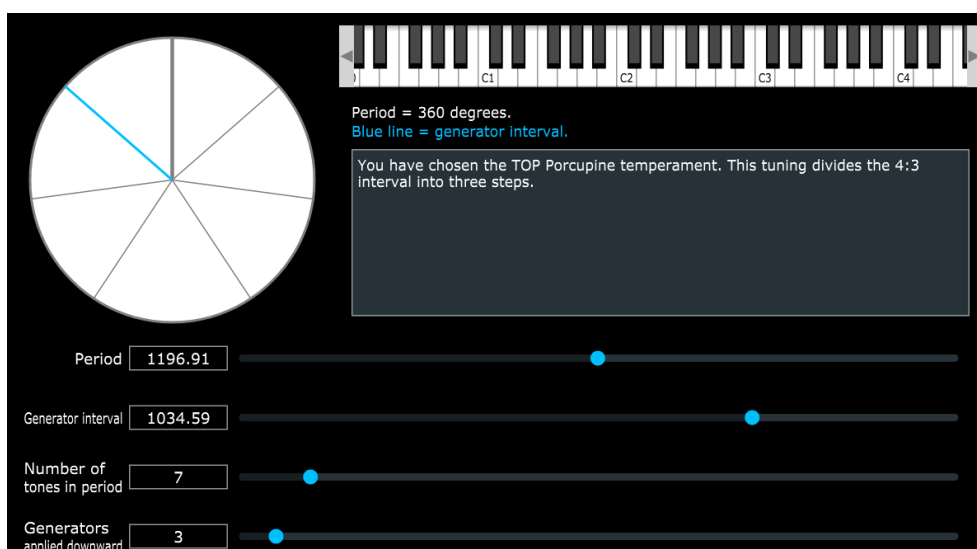
Patří do rodiny zvané *Archytas* [14], která temperuje tzv. *Archytas comma*, jak je nazván poměr $64 : 63$.



Obr. 2.29: TOP Beatles

TOP Porcupine

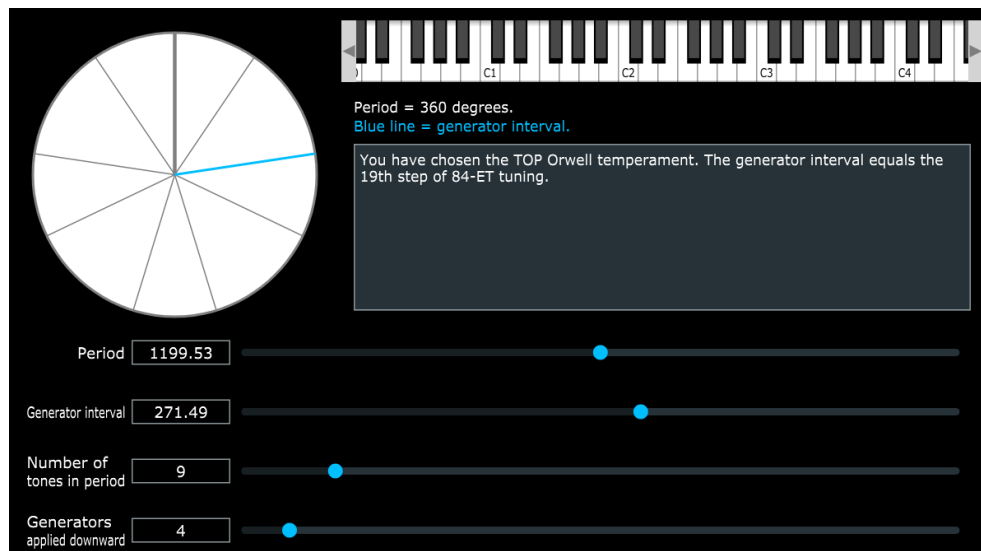
Temperováno je zde tzv. *Porcupine comma* [14] o poměru $250 : 243$. Ladění tohoto typu můžeme rozpoznat podle toho, že dělí interval $4 : 3$ na tři kroky.



Obr. 2.30: TOP Porcupine

TOP Orwell

Pro poukázání na důvtip, se kterým jsou nové temperamenty často definovány, zařazuji do výběru i toto ladění. Interval generátoru zde odpovídá 19 stupňům temperamentu 84-ET [14].



Obr. 2.31: TOP Orwell

2.3 Možnosti dalších vylepšení

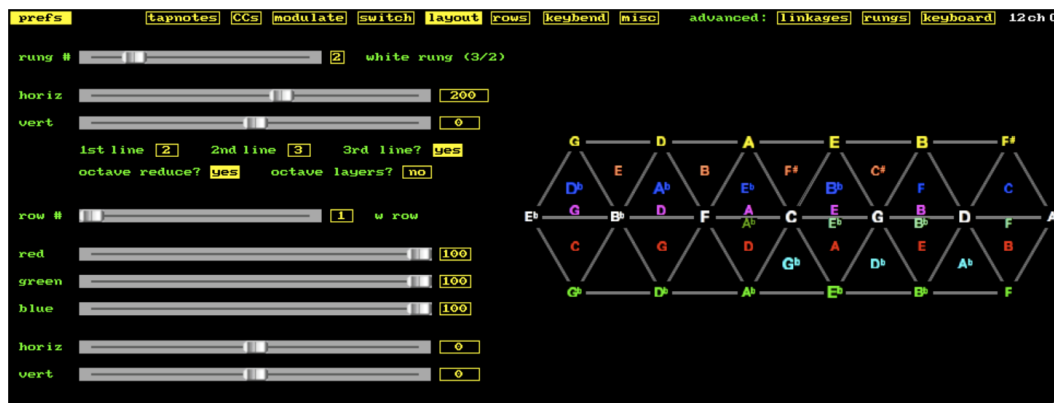
Aplikace vytvořená v rámci této bakalářské práce obsahuje všechny zadáním požadované funkce a několik funkcí dodatečných. Je zde však stále velký prostor pro různá další vylepšení. Nyní shrnu několik nápadů, kudy by se vývoj aplikace dále mohl ubírat.

Zvukový charakter nástroje

Jednou z možností je syntetizovat zvuk podle charakteru nastaveného tónového terénu. Tento nápad byl zpracován v rámci mé semestrální práce. Po úvaze však docházím k závěru, že hlavním prvkem, který dělá aplikaci jedinečnou, není její syntezátorová část, nýbrž neomezené prostředky pro generování dvourozměrných ladění. Přílišné zaměření na zvukový charakter by dle mého názoru mohl aplikaci spíše uškodit.

Nabízí se proto myšlenka, zda v budoucnu nekoncepovat pluginovou verzi programu nikoliv jako virtuální nástroj, nýbrž jako MIDI efekt, který by zvládl přeladit jakýkoliv jiný použitý nástroj.

Na tomto principu však již existuje aplikace jménem **Alt-tuner** od společnosti *Tall Kite* [18]. Ta není příliš známá a od svého vydání se na její funkci příliš nezměnilo. Bylo zde možno měnit tři limity tónového terénu a rozšiřovat oktávu.



Obr. 2.32: Aplikace Alt-tuner od Tall Kite [18]

Pokud by se vývoj aplikace vydal podobným směrem, bylo by zapotřebí udělat si představu, co na Alt-tuneru funguje a co naopak jeho potenciál brzdí, aby byl výsledek schopen odolat konkurenci. Bude tedy důležitou otázkou, zda se do tohoto boje pouštět a nebo dále rozšiřovat původní koncept aplikace.

Za předpokladu, že by bylo primárním záměrem zůstat u syntetizování výsledného zvuku přímo v programu, bylo by vhodné, aby měl jedinečné vlastnosti a korespondoval s charakterem celého konceptu. Napadá mě tudíž přejít od pásmové

omezené matematické syntézy k aditivní syntéze, kdy by amplitudy vyšších harmonických složek mohly být samostatně ovlivňovány a charakter zvuku by se tak mohl měnit dle aktuálně nastaveného temperamentu.

Můj koncept je zatím takový, že by program poměřil interval generátorových kroků (před transpozicí do jedné periody) s harmonickou řadou a tam, kde se tóny sobě nejvíce poměrově blíží, umístil formanty. Tato funkce by šla samozřejmě vypnout či ovlivnit její úroveň.

Uzpůsobení čtení z obrazovky

Nynější verze programu je vytvořena na bázi *accessibility branche* [19] template makeru JUCE, tudíž jsou všechny prvky na obrazovce čitelné pomocí programů pro předčítání z obrazovky. Tyto funkce jsou však v prostředí JUCE poměrně nové a stále probíhá práce na jejich vylepšení, proto se některé prvky při ovládání klávesnicí skrz *screenreader* nechovají optimálně.

Tento problém by měl být vyřešen v průběhu dalších aktualizací *branche*. Je však nejisté, za jak dlouho by vše mohlo fungovat hladce. Proto uvažuji o dočasném zavedení transparentní vrstvy prvků v okně aplikace, která by sloužila konkrétně pro ovládání s použitím *screenreaderu* a počítačové klávesnice. Zde by byly komplexní prvky jako slidery či rozbalovací okna nahrazeny textovými poli pro manuální vepsání hodnoty. Komplikace by tak mohly být do chvíle, kdy bude chování prvků optimalizováno, vyřešeny.

Druhý způsob nastavení parametrů

Uživatel, který se v problematice dvourozměrných temperamentů orientuje, by mohl požadovat možnost generování tónového terénu nikoliv na základě konkrétních parametrů, nýbrž na informaci, jaké komma je temperováno. Nabízí se tedy nápad vytvořit alternativní způsob zadávání. Ten by si žádal rozšíření programu o další fázi matematických výpočtů.

Mohlo by se jednat o prakticky dobře proveditelnou inovaci, která by pro určitou skupinu potenciálních uživatelů znamenala velké zlepšení a zpřístupnění.

Vizualizace pomocí notové osnovy

Pro představu o charakteru nastaveného temperamentu nyní slouží horagram. Pokud by však uživatel potřeboval znát výsledné výšky tónů konkrétně, nebylo by od věci zařadit do okna aplikace prvek, který by tuto informaci obsahoval. Představuji si jednoduchou notovou osnovu, kam by byly programem umístěny piktogramy notových hlaviček dle nastaveného parametru. Nota by byla vždy umístěna na hodnotu

nejbližšího 12-ET stupně a byla by označena její centová vzdálenost od řečeného tónu.

Pod touto vizualizací řady stupňů tónového terénu by se pak mohl nacházet textový řádek s dodatečnými informacemi (frekvence tónu, centová vzdálenost od počátku apod.). Tyto informace by byly vypovídající o charakteru temperamentu i bez vizuální složky, aby měl prvek smysl při použití *screenreaderu*.

Kompatibilita s formátem .tun

V programu je připravena funkce *Save current state* pro ukládání stavu programu jako soubor 2.6. Zde uvažuji o možnosti převést vypočítané hodnoty temperamentu do formátu *.tun*, se kterým je možno nadále operovat v jiných aplikacích či jej dodatečně upravit např. v programu Scala [11].

Závěr

V rámci této bakalářské práce byla navrhnutá a zrealizována audio aplikace pro generování dvourozměrného Erlichova ladění. Požadavky na výsledný produkt byly následující:

1. Aplikace na základě čtyř zadaných parametrů, jimiž jsou velikost periody, velikost intervalu generátoru, počet tónů v periodě a počet kroků generátoru v záporném směru, sestaví fungující a reprodukovatelný tónový terén.
2. Program bude přijímat MIDI zprávy.
3. Bude vytvořena samostatná verze i plugin, který bude fungovat v rámci DAW.
4. Uživatel si bude moci zvolit z deseti přednastavených temperamentů.

Aktuální verze aplikace všechny požadavky splňuje. Kromě základních parametrů obsahuje i další rozšířené volby pro tvorbu temperamentu: Dva postupy řazení tónů v periodě, alternativní rozložení klávesnice a určení výšky počátečního tónu. Uživatelské prostředí nabízí pohyblivý prvek horagramu pro vizuální interpretaci tónových terénů, virtuální klaviaturu ovladatelnou myší nebo klávesnicí a pole pro informační text. Lze vybírat mezi třemi různými zvuky syntezátoru a nastavit jejich ADSR obálku. Program obsahuje 15 presetů.

Pro realizaci byl využit jazyk C++ spolu s *template makerem* JUCE určeným pro audio programování, konkrétně s jeho *accessibility branch*, která zajišťuje kompatibilitu vizuálních prvků s programy pro čtení z obrazovky. Toto ovládání bude ještě třeba optimalizovat pro pohodlné používání.

Přestože program všechny body zadání již splňuje, dalo by se na jeho rozvíjení pracovat dál v rámci magisterského studia. Kromě doladění čtení z obrazovky je možno buď rozvinout zvukový charakter nebo program učinit schopným alterovat ladění jiných virtuálních nástrojů. Dal by se přidat druhý mechanismus zadávání parametrů, a to skrze temperováním zaniklé komma. Temperamenty by šlo ukládat do počítače ve formátu *.tun*.

Tato aplikace má dle mého názoru potenciál najít reálné a široké využití, a to jak mezi odborníky na ladění, tak mezi běžnými muzikanty se zájmem o mikrotonalitu.

Literatura

- [1] ERLICH, P. *A Middle Path Between Just Intonation and the Equal Temperaments, Part 1, 2004*. Dostupné z URL: <<https://sethares.engr.wisc.edu/paperspdf/Erlich-MiddlePath.pdf>>
- [2] BUSONI, F. *Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst*. Esej, Leipzig: Insel-Verlag, 1907.
- [3] FLAŠAR, M. *Elektronická hudba*. Masarykova univerzita, 2015.
- [4] GEIST, B. *Akustika - Jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Muzikus, 2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [5] HELMHOLTZ, H. a A. J. ELLIS *On the sensations of tone as a physiological basis for the theory of music*. London, New York: Longmans, Green, and Co., 1895. Dostupné z URL: <<https://archive.org/details/onsensationsofto00helmrich/page/290/mode/2up>>
- [6] GRUBER, A. *Journal of Music Theory, Vol. 14, No. 1*. Duke University Press on behalf of the Yale University Department of Music, 1970. Dostupné z URL: <<http://www.jstor.org/stable/843036>>
- [7] MATHIEU, W. A. *Harmonic experience - Tonal harmony from its natural origins to its modern expression*. Rochester, Vermont: Inner Traditions, 1997. ISBN 978-0-89281-560-9.
- [8] WERNTZ, J. *Perspectives of New Music, Vol. 39, No. 2*. Perspectives of New Music, 2001. Dostupné z URL: <<http://www.jstor.org/stable/833567>>
- [9] LOEFFLER, D. B.: *Instrument Timbres and Pitch Estimation in Polyphonic Music*. Master's Thesis, Georgia Tech, Department of Electrical and Computer Engineering, 2006.
- [10] KRITOV, A.: *GalactiX VSTis, 2020*. Dostupné z URL: <<https://www.soundmodeler.com/files/galactix.php>>
- [11] *Scala, 2021*. Dostupné z URL: <<http://www.huygens-fokker.org/scala/>>
- [12] *JUCE.com Class Index, 2021* Dostupné z URL: <<https://docs.juce.com/master/index.html>>
- [13] *JUCE.com Projucer, 2021*. Dostupné z URL: <<https://juce.com/discover/projucer>>

- [14] *Xenharmonic Wiki*, 2021. Dostupné z URL: <<https://en.xen.wiki/w/>>
- [15] *Wikipedia, Moon River*, 2021. Dostupné z URL: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Moon_River>
- [16] *Jacob Collier*. Oficiální webové stránky, 2021. Dostupné z URL: <<https://www.jacobcollier.com/>>
- [17] *Anaphoria, Wilson Archives*. Dostupné z URL: <<http://www.anaphoria.com/wilson.html>>
- [18] *Tall Kite, Alt-tuner microtonal software*, 2014. Dostupné z URL: <<http://www.tallkite.com/alt-tuner.html>>
- [19] *GitHub, JUCE Accessibility branch*, 2021. Dostupné z URL: <<https://github.com/juce-framework/JUCE/blob/develop/docs/Accessibility.md>>

Seznam symbolů a zkratek

DAW	Digital Audio Workstation. Software používaný k manipulaci se zvukovým signálem.
C++	C plus plus. Programovací jazyk.
ADSR	Attack Delay Sustain Release. Části průběhu dynamické obálky signálu.
ET	Equal Temperament. Rovnoměrně temperovaná soustava. Někdy také EDO, neboli Equal Divided Octave
TOP	Tempered Octaves, Please. Označení pro temperamenty, kdy oktáva neodpovídá 1200 centům.
VST	Virtual Studio Technology. Formát pro software typu plugin.
MIDI	Musical Instrument Digital Interface. Standard pro digitální komunikaci audio zařízení.
IU	Imaginary User. Představa cílového zákazníka.
JI	Just Intonation. Přirozené ladění založené na harmonické řadě.
C	Cent. Nejmenší používaná jednotka pro poměrovou výšku tónu.
UI	User Interface. Uživatelské prostředí.
.tun	Formát pro přenos informace o tónovém terénu.
MOS	Moment of Symmetry. Stav, při kterém krok generátoru rozdělí periodu na pravidelné celky.

Přílohy

K této bakalářské práci náleží tři složky elektronických příloh:

1. Kompletní kód (složka kod)
2. Program (složka program)
3. Zvukové ukázky temperamentů (složka zvukove_ukazky)

Kompletní kód

Tato příloha obsahuje kódový materiál ve formátu *.pdf*.

```
kod/
├── Data/
│   ├── MathDataCpp
│   ├── MathDataHeader
│   ├── OscDataCpp
│   ├── OscDataHeader
│   ├── SoundDataCpp
│   └── SoundDataHeader
├── PluginEditor/
│   ├── PluginEditorCpp
│   └── PluginEditorHeader
├── PluginProcessor/
│   ├── PluginProcessorCpp
│   └── PluginProcessorHeader
├── Synth/
│   ├── SynthSound
│   ├── SynthVoiceCpp
│   └── SynthVoiceHeader
└── UI/
    ├── HoragramComponentCpp
    ├── HoragramComponentHeader
    ├── KeyboardComponent
    ├── MathComponentCpp
    ├── MathComponentHeader
    ├── OscComponentCpp
    ├── OscComponentHeader
    ├── SoundComponentCpp
    └── SoundComponentHeader
```

Program

V této složce se nacházejí soubory **R2DetunePlugin.exe** a **R2DetunePlugin.vst3**, které obsahují aktuální verzi aplikace. Soubor EXE je standalone verze. Soubor VST3 je určen pro otevření pomocí DAW.

Zvukové ukázky temperamentů

Složka obsahuje 14 souborů typu *.mp3*, které názvem i obsahem odpovídají presetům programu kromě ladění 12-ET, které je vynecháno. Ve zvukové ukázce vždy zazní chromatický sled třinácti kláves od jednočárkovaného po dvoučárkované C, a to nejprve v 12-ET, potom v konkrétním presetu a nakonec v obou zároveň pro přímé porovnání. Jedinou výjimkou je 24-ET, kde jako ukázka slouží diatonická stupnice přes dvě oktávy. Je tomu tak kvůli lepší demonstraci rozdělení klaviatury. Tento soubor také obsahuje krátkou ukázkou čtvrttónové modulace ze skladby Moon River [15] [16].